

**Aalto-yliopisto**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Kimmo Nepola

**Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten soveltuvuus  
suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26.4.2013.

Työn valvoja: Prof. Liisa Haarla

Työn ohjaaja: DI Daniel Kuosa

AALTO-YLIOPISTO  
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN  
TIIVISTELMÄ

Tekijä: Kimmo Nepola

Työn nimi: Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten soveltuvuus suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan

Päivämäärä: 26.4.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 71+6

Sähkötekniikan laitos

Professori: Sähköjärjestelmät

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Liisa Haarla

Ohjaaja: DI Daniel Kuosa

Tiivistelmäteksti:

Suurjännitteisten sähköasemalaitteiden eristysrakenteissa kehittyviin vikoihin liittyy usein voimakkaassa ja epähomogeenisessa sähkökentässä syntyviä osittaispurkauksia. Osittaispurkausmittausten avulla on mahdollista saada varoitus kehittyvästä viasta ja siten ajoittaa huoltotoimenpiteet ennen kuin laitteen täydellinen tuhoutuminen ja siitä verkolle aiheutuva häiriö ehtivät tapahtua.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, soveltuvatko radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset (RFI-mittaukset) suurjännitelaitteiden kunnonvalvontaan. Erityisen mielenkiinnon kohteena oli muuntajissa, mittamuuntajissa, läpivienneissä ja kaapelipääteissä esiintyvien sisäisten osittaispurkauksien havaitseminen. Tässä työssä toteutettu RFI-menetelmän arviointi perustuu 13:lla kantaverkon sähköasemalla tehtyihin mittauksiin ja niiden vertailuun suurjännitelaboratoriossa suoritettuihin referenssimittauksiin, mittauksista saatuihin käytännön kokemuksiin sekä aiempaan tutkimustietoon aiheesta. Menetelmän soveltuvuutta ei arvioitu taloudellisesta näkökulmasta.

Diplomityössä tehtyjen mittausten perusteella todetaan, että menetelmällä pystytään havaitsemaan ja paikantamaan sähköasemalaitteissa esiintyviä osittaispurkauksia. Vikapaikka pystytään pääsääntöisesti löytämään laiteklusterin tarkkuudella, kun käytetään ympärisäteilevää antennia ja hyödynnetään signaalin voimistumista vikapaikkaa lähestyttäessä. Yhdistelemällä tietoa eri osittaispurkauksien synnyttämistä taajuusspektreistä epäiltyyn vikapaikkaan pystytään tekemään arvioita osittaispurkauksen tyypistä. Menetelmällä pystytään seulomaan suuria laitepopulaatioita, koska mittaukset voidaan tehdä ilman käyttökeskeytyksiä. RFI-mittausten perusteella ei voida suoraan arvioida purkausvian suuruutta tai vakavuutta. Epäilylle vikakohteelle voidaan kuitenkin kohdistaa muita tarkentavia diagnostisia mittauksia, jotka vahvistavat osittaispurkaushavainnon ja vian vakavuuden.

Johtopäätöksissä todetaan RFI-menetelmän soveltuvan suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan. Menetelmän käyttöönottoa on kuitenkin arvioitava myös käyttövarmuuden, henkilöturvallisuuden ja taloudellisista näkökulmista.

Avainsanat:

osittaispurkaus, suurjännite, sähköasema, radiotaajuinen osittaispurkausmittaus, RFI, kunnonvalvonta

AALTO UNIVERSITY  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE  
MASTER'S THESIS

Author: Kimmo Nepola

Title: Feasibility of radio frequency interference measurements in condition monitoring of high voltage substations

Date: 26.4.2013

Language: Finnish

Number of pages: 71+6

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Liisa Haarla

Instructor: M.Sc. (Tech.) Daniel Kuosa

Abstract:

Partial discharges resulting from strong and inhomogeneous electrical fields are one of the major factors which accelerate the degeneration of electrical insulations. Partial discharge monitoring provides early warnings for upcoming failures and thereby allows for scheduling of maintenance actions before a complete breakdown.

This thesis assesses the feasibility of radio frequency measurements used in condition monitoring of high voltage substations. Detection of internal discharges in power and instrument transformers, bushings and cable terminations are of particular interest. The RFI method is evaluated based on laboratory measurements and measurements performed at 13 high voltage substations along with practical experience and prior research. The economical perspective is not addressed in this thesis.

Based on the results presented in this thesis, it is possible to detect and locate partial discharges at high voltage substations. Using an omnidirectional antenna and signal attenuation, partial discharge can typically be located within the accuracy of a device cluster in a switch bay. Incorporating frequency spectrum information produced by varying partial discharges with the suspected signal source (fault location) enables evaluation of partial discharge type. RFI measurements allow for the screening of large populations as they can be performed without unnecessary service interruptions. The magnitude or severity of partial discharges cannot be evaluated with the RFI method. However, other more accurate diagnostic measurements can be targeted to confirm partial discharge once they are initially discovered using the RFI method.

As a conclusion, RFI measurements are feasible for condition monitoring of high voltage substations. However in addition, operational reliability, economic feasibility, and personal safety aspects are to be evaluated before implementing this method.

Keywords:

partial discharge, high voltage, substation, radio frequency interference, RFI, condition monitoring, surveillance

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:ssä opinnäytteeksi Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoululle. Työn tekeminen on ollut mielenkiintoinen ja muistorikas kokemus. Apua ja tukea työpäiviin ovat tuoneet lukuisat eri henkilöt, joita haluan tässä yhteydessä kiittää.

Haluan kiittää työni valvojaa professori Liisa Haarlaa tieteelliseen kirjoittamiseen liittyvästä avusta ja neuvoista.

Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajaa DI Daniel Kuosaa, jolta sain kiireiden keskelläkin aina neuvoa ja ohjausta työhöni liittyvissä kysymyksissä.

Erikoisasiantuntija Pekka Lepistöä kiitän hyödyllisistä keskusteluista, kiinnostuksesta työtäni kohtaan sekä avusta vikaselvityksissä.

Mahdollisuudesta tehdä mittauksia Aalto-yliopiston suurjännitelaboratoriossa sekä laboratoriomittauksiin saamastani avusta haluan suuresti kiittää TkT Petri Hyvöstä ja TkT Joni Klüssiä. Kiitän Jonia myös työni kommentoinnista.

DI Minnakaisa Ahosta haluan kiittää diplomityöhöni liittyvistä käytännönjärjestelyistä sekä kaikesta kannustuksesta ja luottamuksesta, jota olen häneltä työurani alkutaipaleella saanut. Kiitos kuuluu myös kaikille työkavereilleni mukavasta ja innostavasta ilmapiiristä.

Ilkka Luukkosta haluan kiittää työn kommentoinnista sekä avusta Matlabin kanssa.

Vanhempiani kiitän kaikesta saamastani tuesta. Erikoiskiitos kuuluu isälleni myös paneutumisesta kommentointiin ja oikolukuun hämmästyttävällä tarkkuudella.

Suurimman kiitoksen haluan kuitenkin osoittaa Jutalle, jonka ilo ja tuki ovat siivittäneet opintojani ja elämäni.

Espoossa 26.4.2013

Kimmo Nepola

## Sisällysluettelo

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Alkusanat .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Sisällysluettelo .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Symbolit ja lyhenteet .....</b>                                     | <b>6</b>  |
| <b>1 Johdanto .....</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1 Tutkimuksen motivaatio.....  | 8         |
| 1.2 Tutkimustavoite ja -kysymykset .....                               | 9         |
| 1.3 Tutkimusraportin rakenne .....                                     | 10        |
| <b>2 Osittaispurkaukset.....</b>                                       | <b>11</b> |
| 2.1 Osittaispurkauksen esiintyminen ja vaikutukset .....               | 11        |
| 2.2 Osittaispurkaustyypit .....  | 14        |
| 2.2.1 Sisäiset osittaispurkaukset.....                                 | 14        |
| 2.2.2 Pintapurkaukset .....  | 14        |
| 2.2.3 Koronapurkaukset .....   | 15        |
| 2.2.4 Kipinäpurkaukset .....   | 15        |
| 2.3 Osittaispurkauksen syntyminen .....                                | 16        |
| 2.4 Ympäristöolosuhteiden vaikutus osittaispurkausilmiöihin .....      | 17        |
| 2.4.1 Lämpötilan vaikutus sisäisiin osittaispurkauksiin.....           | 18        |
| 2.4.2 Veden ja lumen vaikutus koronapurkauksiin.....                   | 19        |
| 2.4.3 Ympäristötekijöiden vaikutus pintapurkauksiin .....              | 20        |
| 2.5 Osittaispurkauksien suuret .....                                   | 20        |
| 2.6 Osittaispurkauksien tunnistaminen ja arviointi .....               | 22        |
| <b>3 Osittaispurkauksen synnyttämä sähkömagneettinen säteily .....</b> | <b>25</b> |
| 3.1 Syntymekanismi .....   | 25        |
| 3.2 Voimajohdot ja sähköasemakomponentit säteilijöinä.....             | 26        |
| 3.3 Säteilyn vaimeneminen .....  | 27        |
| 3.4 Säteilyn mittaaminen avoimessa tilassa .....                       | 29        |
| 3.5 Heijastukset ja sirona .....                                       | 30        |
| <b>4 RFI-mittausmenetelmä.....</b>                                     | <b>31</b> |
| 4.1 Mittausmenetelmän esittely .....                                   | 31        |
| 4.2 Impulssipulssimaisten signaalien mittaaminen .....                 | 33        |
| 4.2.1 Pyyhkäisevä spektrianalysaattori ja ilmaisintyypit .....         | 33        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.2     | Signaalien erottaminen toisistaan.....                                   | 34        |
| 4.2.3     | Matalan toistotaajuuden signaalien mittaaminen .....                     | 35        |
| 4.3       | Purkaustyyppin tunnistaminen taajuusspektrin perusteella .....           | 36        |
| 4.4       | Purkauksen paikantaminen.....  | 39        |
| <b>5</b>  | <b>PDS100-mittalaite .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>6</b>  | <b>Mittaukset suurjännitelaboratoriossa.....</b>                         | <b>42</b> |
| 6.1       | Mittausjärjestelyt.....  | 42        |
| 6.2       | Testikappaleet .....   | 43        |
| 6.3       | Mittaustulokset.....   | 46        |
| <b>7</b>  | <b>Mittaukset sähköasemilla.....</b>                                     | <b>52</b> |
| 7.1       | Mittauksien suorittaminen sähköasemalla .....                            | 52        |
| 7.2       | Mittaustulokset.....   | 54        |
| 7.2.1     | Osittaispurkauksista vapaat kohteet .....                                | 55        |
| 7.2.2     | Anttilan 400 kV:n virtamuuntaja .....                                    | 56        |
| 7.2.3     | Kangasalan 20 kV:n kaapelipäätteet .....                                 | 57        |
| 7.2.4     | Espoon 400 kV:n kiskojännitemuuntaja .....                               | 58        |
| 7.2.5     | Ruotsinkylän 110 kV:n ohikytkentäerotin .....                            | 59        |
| 7.2.6     | Espoon 110 kV:n kiskoliitin.....   | 60        |
| 7.2.7     | Forssan 110 kV:n virtamuuntaja .....                                     | 61        |
| 7.2.8     | Tammiston ja Nurmijärven kipinäpurkaukset.....                           | 62        |
| <b>8</b>  | <b>Analyysi mittaustuloksista ja havainnoista .....</b>                  | <b>63</b> |
| 8.1       | Laboratoriomittaukset .....  | 63        |
| 8.2       | Sähköasemamittaukset .....   | 64        |
| <b>9</b>  | <b>Johtopäätökset .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>10</b> | <b>Lähdeluettelo.....</b>  | <b>69</b> |
|           | <b>Liitteet .....</b>  | <b>72</b> |
|           | LIITE A - Laboratoriomittausten aikataason tulokset.....                 | 72        |
|           | LIITE B - Sähköasemamittausten aikataason tulokset.....                  | 75        |
|           | LIITE C - Anttilan 400 kV:n virtamuuntajien öljyanalyysin tulokset ..... | 77        |

## Symbolit ja lyhenteet

---

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $A_e$                 | vastaanotinantennin sieppauspinta-ala                     |
| $b$                   | Fresnelin säde  |
| $\vec{\mathbf{B}}(t)$ | magneettivuon tiheys                                      |
| $c$                   | valonnopeus   |
| $C_a$                 | hajakapasitanssi  |
| $C_b$                 | hajakapasitanssi  |
| $C_c$                 | hajakapasitanssi  |
| $d$                   | etäisyys  |
| $\vec{\mathbf{D}}(t)$ | sähkövuon tiheys  |
| $\vec{\mathbf{E}}(t)$ | sähkökentän voimakkuus                                    |
| $f$                   | taajuus   |
| $G_R$                 | vastaanottoantennin maksimisuuntavahvistus                |
| $G_T$                 | lähetysantennin maksimisuuntavahvistus                    |
| $\vec{\mathbf{H}}(t)$ | magneettikentän voimakkuus                                |
| $\vec{\mathbf{J}}(t)$ | sähkövirran tiheys  |
| $L$                   | vapaan tilan vaimennus                                    |
| $p$                   | paine   |
| $P_{Di}$              | säteilyteho pinta-alayksikköä kohden                      |
| $P_R$                 | vastaanottimen sieppaama teho                             |
| $P_T$                 | osittaispurkauksen säteilyteho                            |
| $T$                   | lämpötila   |
| $U_a$                 | jännite kolmikapasitanssimallissa                         |
| $U_b$                 | jännite kolmikapasitanssimallissa                         |
| $U_c$                 | jännite kolmikapasitanssimallissa                         |
| $U_{i+}, U_{i-}$      | positiivisen ja negatiivisen polariteetin syttymisjännite |
| $U_{e+}, U_{e-}$      | positiivisen ja negatiivisen polariteetin sammumisjännite |

|               |  |
|---------------|--|
| $V$           | ontelon tilavuus   |
| $V_e$         | eristeaineen tilavuus  |
| $\alpha$      | materiaaliin liittyvä vaimennuskerroin   |
| $\beta$       | tilavuuden lämpölaajenemiskerroin  |
| $\varepsilon$ | väliaineen permittiivisyys   |
| $\lambda$     | aallonpituus   |
| $\mu$         | väliaineen permeabiliteetti  |
| CD            | coupling device, kytkinlaite   |
| CIGRE         | Conseil International des Grands Réseaux Electriques,<br>Council on Large Electric Systems |
| GIS           | gas insulated switchgear, kaasueristeinen kytkinlaitos                                     |
| ESBI          | ESB International -yhtiö   |
| HFCT          | high frequency current transformer, suurtaajuus-<br>virtamuuntaja                          |
| IEC           | International Electrotechnical Commission  |
| IF            | intermediate frequency, välitaajuus  |
| L1, L2, L3    | vaihemerkintä  |
| PD            | partial discharge, osittaispurkaus   |
| RFI           | radio frequency interference, radiotaajuinen häiriö  |
| SPAM          | separate peak and average mode,<br>erillinen huippu- ja keskiarvomoodi                     |
| TEV           | transient earth voltage, metalliseen kuoreen indusoituva<br>jännitepulssi                  |
| TDCG          | total dissolved combustible gas, palavien vikakaasujen<br>yhteenlaskettu määrä             |
| UHF           | ultra high frequency, radiotaajuusalue 0,3–3 GHz   |
| VCO           | voltage-controlled oscilloscope, jänniteohjattu<br>oskilloskooppi                          |
| VHF           | very high frequency, radiotaajuusalue 30–300 MHz   |
| XLPE          | cross-linked polyethylene, ristisilloitettu polyeteeni                                     |



# 1 Johdanto

---

## 1.1 Tutkimuksen motivaatio

Suurjännitteisten sähköasemalaitteiden eristysrakenteissa kehittyviin vikoihin liittyy usein voimakkaassa ja epähomogeenisessa sähkökentässä syntyviä osittaispurkauksia. Ajan kuluessa on mahdollista, että vika etenee hitaasti osittaispurkauksen aiheuttaman eroosion vaikutuksesta elektrodilta elektrodille tapahtuvaan täydelliseen purkaukseen asti, mikä suurjännitelaitteiden tapauksessa on yleensä katastrofaalinen ja vaarallinen tapahtuma. Osittaispurkausmittausten avulla on mahdollista saada varoitus kehittyvästä viasta ja siten ajoittaa huoltotoimenpiteet ennen kuin laitteen täydellinen tuhoutuminen ja siitä verkolle aiheutuva häiriö ehtivät tapahtua.

Perinteiset osittaispurkauksen tunnistamiseen ja luokitteluun käytetyt mittaussuomenetelmät perustuvat galvaaniseen kosketukseen testattavaan laitteeseen, mikä tarkoittaa ei-toivottua käyttökeskeytystä laitteelle ja kyseiselle verkon osalle. Käyttökeskeytyksistä ei kuitenkaan tarvita, kun käytetään radiotaajuisia osittaispurkausmittauksia eli RFI-suomenetelmää (*Radio Frequency Interference*).

Radiotaajuisten mittausten soveltaminen sähköverkkojen kunnonvalvontaan sai alkunsa tuhoisasta muuntajaviasta verkkoyhtiö National Gridin muuntoasemalla Iso-Britanniassa 1980-luvulla. Sähköaseman lähiasukkaat olivat valittaneet televisio- ja radiohäiriöistä ennen muuntajapalaa, mutta nämä häiriöt poistuivat muuntajan tuhouduttua. Tällöin ymmärrettiin, että radiotaajuuksia seuraamalla voidaan havaita ja paikantaa osittaispurkauksia. Näiden havaintojen perusteella National Grid otti käyttöön ensimmäiset yksinkertaiset radiovastaanottimet osittaispurkauksen havaitsemiseen suurjännitteisistä laitteista. [1]

Myöhemmästä kokemuksesta ja tutkimuksista [1-6] tiedetään, että eristysrakenteissa syntyvät osittaispurkaukset todella synnyttävät hyvin laajakaistaisen signaalin, joka ulottuu jopa yli 1 GHz:n taajuudelle. Näin ollen purkaussignaali on mahdollista havaita radiovastaanottimella ja siten haitalliset osittaispurkaukset voidaan paikallistaa hyvissä ajoin ennen kuin niistä kehittyy läpilyönnin aiheuttava vika. Radiotaajuisten osittaispurkausmittauksen erityinen etu on se, että sillä voidaan käsitellä suuri laitepopulaatio nopeasti ja helposti kerralla ilman käyttökeskeytyksiä. Suomenetelmällä havaittuihin ongelmatapauksiin voidaan tämän jälkeen kohdistaa tarkempia diagnostisia jatkotoimenpiteitä kuten dielektrisiä mittauksia tai öljyanalyyssejä.

RFI-suomenetelmän soveltuvuudesta sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan ei ole kuitenkaan vielä laajamittaista käytännön kokemusta Suomessa. Tampereen teknillisessä korkeakoulussa aihetta on tutkittu 1990-luvun alussa. [2, 3] Radiohäiriömittausten soveltuvuutta kantaverkon sähköasemien kunnonvalvontaan on kokeiltu myös muun muassa Yleisradion ja Tampereen teknillisen yliopiston tekemillä radiohäiriömittauksilla. [7, 8] Nämä tutkimukset ja kokeilut ovat keskittyneet ulkoisten korona- ja kipinäpurkauksen tunnistamiseen ja haittoihin nimenomaan radio- ja televisiosignaaleille.

Muiden verkkoyhtiöiden, esimerkiksi National Gridin ja ESBI:n, myönteiset kokemukset RFI-menetelmästä ja erilaiset käytännön syyt ovat kuitenkin nostaneet aiheen jälleen pinnalle kantaverkkoyhtiö Fingridillä. Esimerkiksi mittamuuntajien, läpivientien ja kaapelipäätteiden kunnonvalvontaan haluttaisiin joustavia menetelmiä, sillä nykyisin mittamuuntajista ja öljyeristeisistä läpivienneistä ei voida teknisistä ja taloudellisista syistä ottaa säännöllisesti öljynäytteitä, jotka paljastaisivat osittaispurkausviat tehokkaasti. Kaapelipäätteiden osittaispurkaustasojia ei myöskään nykyisin seurata Fingridillä. [8]

Aiemmat tutkimukset ovat keskittyneet vaarattomiin ja harmittomiin korona- ja kipinäpurkauksiin. Sähköasemalaitteiden kunnonvalvonnan kannalta sisäiset osittaispurkaukset ovat kuitenkin huomattavasti tärkeämpiä, koska ne voivat johtaa laitteen tuhoutumiseen. Näistä syistä Fingrid on päättänyt tutkia aihetta ja hankkinut RFI-menetelmän arviointia varten Doble Engineering -yhtiön valmistaman kannettavan PDS100-mittalaitteen. Jos radiotaajuisilla osittaispurkausmittauksilla pystytään havaitsemaan ja paikantamaan erilaisia osittaispurkauksia, menetelmä voidaan mahdollisesti ottaa käyttöön nykyisten kunnonvalvontamenetelmien rinnalle ja osaksi kantaverkon ennakoivaa kunnossapitoa. Tavoitteena on käyttää RFI-menetelmää karkeana seulana, jonka avulla kohdistetaan tarkempia diagnostisia mittauksia epäilyille vikakohteille.

## 1.2 Tutkimustavoite ja -kysymykset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, soveltuvatko radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan. Erityisen mielenkiinnon kohteena on muuntajissa, mittamuuntajissa, läpivienneissä ja kaapelipäätteissä esiintyvät sisäiset osittaispurkaukset.

Tässä työssä toteutettava RFI-menetelmän arviointi perustuu sähköasemilla tehtäviin mittauksiin ja niiden vertailuun suurjännitelaboratoriossa suoritettuihin referenssimittauksiin, mittauksista saataviin käytännön kokemuksiin sekä aiempaan tutkimustietoon aiheesta. Diplomityössä ei arvioida menetelmän soveltuvuutta taloudellisesta näkökulmasta. Tutkimustavoitteeseen pyritään etsimällä vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Millaisia purkausvikoja radiotaajuisilla osittaispurkausmittauksilla pystytään havaitsemaan?
- Pystytäänkö osittaispurkauksen tyyppi tunnistamaan tulkitsemalla taajuustason ja aikatazon signaaleja?
- Kuinka luotettava taajuus- ja aikatazon mittausten tulkinta on?
- Kuinka tarkasti vika voidaan paikantaa ympärisäteilevällä ja suuntaavalla antennilla?
- Kuinka herkkä mittausmenetelmä on ulkoisille tekijöille kuten sääolosuhteille?
- Mitkä ovat menetelmän vahvuudet ja heikkoudet?

### **1.3 Tutkimusraportin rakenne**

Luvussa 2 tarkastellaan eristysrakenteissa tapahtuvia osittaispurkauksia. Tarkoitus on ymmärtää eristysten kuntoa heikentävien osittaispurkausten vaikutus- ja esiintymismekanismit. Lisäksi luvussa tarkastellaan osittaispurkausten tunnistamiseen ja luokitteluun liittyviä yleisiä tekijöitä.

Luvussa 3 käsitellään osittaispurkausten synnyttämää sähkömagneettista säteilyä sen mittaamisen näkökulmasta. Erityisen mielenkiinnon kohteena on säteilyn syntyminen, vaimeneminen ja mittaaminen vapaassa tilassa.

Luvussa 4 esitellään RFI-mittausmenetelmän teoreettinen perusta. Luvussa keskitytään pulssimaisten signaalien havaitsemiseen, eri purkaustyyppien tunnistamiseen taajuusspektrin perusteella sekä purkauslähteiden paikantamiseen.

Luvussa 5 esitellään tämän diplomityön soveltavan osuuden mittauksissa käytetty PDS100-mittalaite.

Luvussa 6 ja 7 esitellään suurjännitelaboratoriossa ja sähköasemilla tehtyjen radiotaajuisten osittaispurkausmittausten tulokset ja niistä saadut keskeiset havainnot.

Luvussa 8 analysoidaan tässä työssä tehtyjä radiotaajuisia osittaispurkausmittauksia sekä mittausmenetelmän soveltuvuutta suurjännitelaitteiden kunnonvalvontaan.

Luvussa 9 esitetään tämän diplomityön johtopäätökset.

## 2 Osittaispurkaukset

---

*Tämän luvun tarkoitus on antaa riittävä teoreettinen ymmärrys osittaispurkauksista, jotta niiden mittaaminen ja erityisesti mittaustulosten tulkitseminen olisi mahdollista. Lisäksi tavoitteena on ymmärtää, minkälaisissa rakenteissa osittaispurkauksia tyypillisesti esiintyy. Luvun alussa tarkastellaan osittaispurkausten esiintymistä ja eri purkaustyyppejä. Tämän jälkeen esitellään osittaispurkausten mittaamista ja siihen liittyviä suureita, joiden avulla eri osittaispurkaustyyppjä pystytään tunnistamaan ja luokittelemaan.*

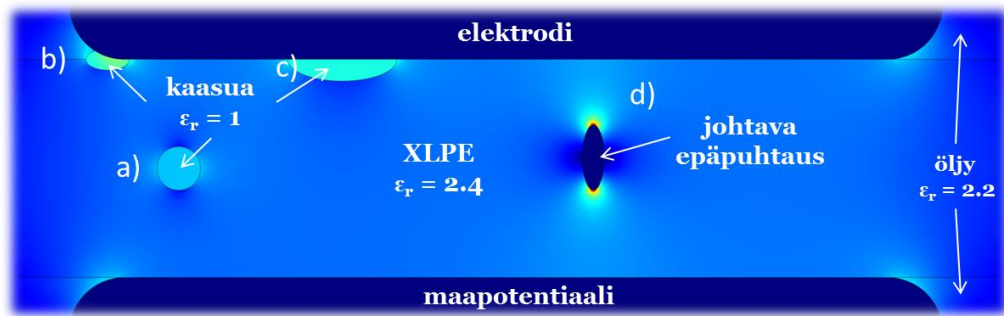
### 2.1 Osittaispurkausten esiintyminen ja vaikutukset

Eristys on suurjännitelaitteen osa, jonka tarkoitus on nimensä mukaisesti eristää suurjännitteiset osat toisistaan tai maapotentiaalista, mikä on välttämätöntä laitteen tarkoituksenmukaisen ja turvallisen toiminnan kannalta. Eristysrakenne voi olla kaasua, nestemäinen, kiinteä tai näiden yhdistelmä. Kun eristyksen yli vaikuttaa jännite, sen läpi kulkee vuotovirta, koska mikään eriste ei ole ideaalinen. Vuotovirran merkittävä kasvu on merkki siitä, että eristeessä tapahtuu sähköpurkauksia tai eristys on vaurioitumassa. Nämä sähköpurkaukset voidaan jakaa joko täydellisiin tai epätäydellisiin purkauksiin. [4]

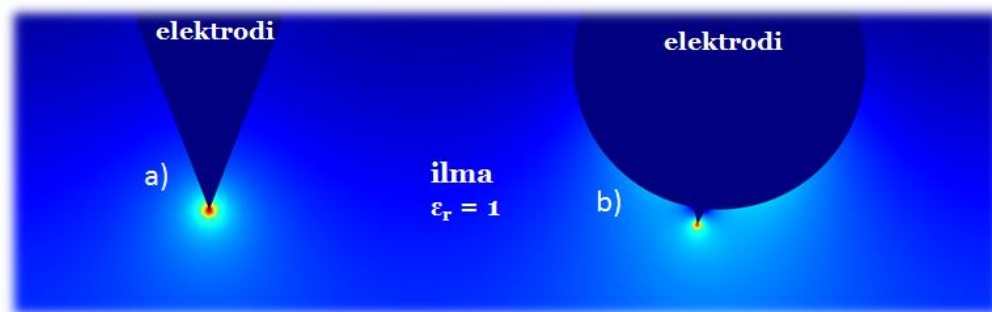
Eristeessä tapahtuvaa sähköpurkausta kutsutaan täydelliseksi silloin, kun purkaus tapahtuu elektrodilta elektrodille eli, kun sähkökentän voimakkuus ylittää koko eristysosan sähkölujuuden. Tällöin eristeen läpi kulkee suuri virta, ja jännite eristeen yli on romahtanut pieneksi. Purkaushetkellä eristyksen yli tai läpi syntyy voimakkaasti ionisoitunut ja hyvin kuuma kanava, jota kutsutaan valokaareksi. [4]

Kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristyksen sähkölujuuden vain osittain, syntyy epätäydellisiä purkauksia ja tällöin puhutaankin osittaispurkauksista (*partial discharge, PD*). Standardi IEC 60270 [9] määrittelee osittaispurkaukset sellaisiksi paikallisiksi sähköpurkauksiksi, jotka vain osittain yhdistävät eristyksen elektrodien välillä. Täten osittaispurkaukset eivät aiheuta eristeen välitöntä tuhoutumista, vaan eristeen tuhoutuminen tapahtuu vähitellen.

Kuvat 2.1 ja 2.2 esittävät erilaisia osittaispurkauksille alttiita vikapaikkoja eristeissä. Kuvista nähdään, että erilaiset kaasuontelot, epäpuhtaudet, eristeiden rajapinnat ja terävät kärjet aiheuttavat sähkökenttään epähomogeenisia tihtymyksiä, joissa kentän voimakkuus on pienellä alueella ympäröivää normaalia kentänvoimakkuutta korkeampi. Tällaisissa kohdissa voi syntyä osittaispurkauksia, jos kentän voimakkuus ylittää eristeen sähkölujuuden. Syitä tällaisiin vikapaikkoihin voivat olla esimerkiksi virheet suurjännitelaitteen valmistuksessa, kuljetuksessa tai asennuksessa, liiallinen kuormittaminen tai ympäristöolosuhteet.



Kuva 2.1. Osittaispurkauksille alttiita vikapaikkoja eristeessä. a) Sisäinen kaasuntelo. b) Kaasuntelo eristeiden rajapinnalla. c) Kaasuntelo elektrodin ja eristeen rajapinnalla. d) Eristeessä oleva johtava epäpuhtaus. [10]



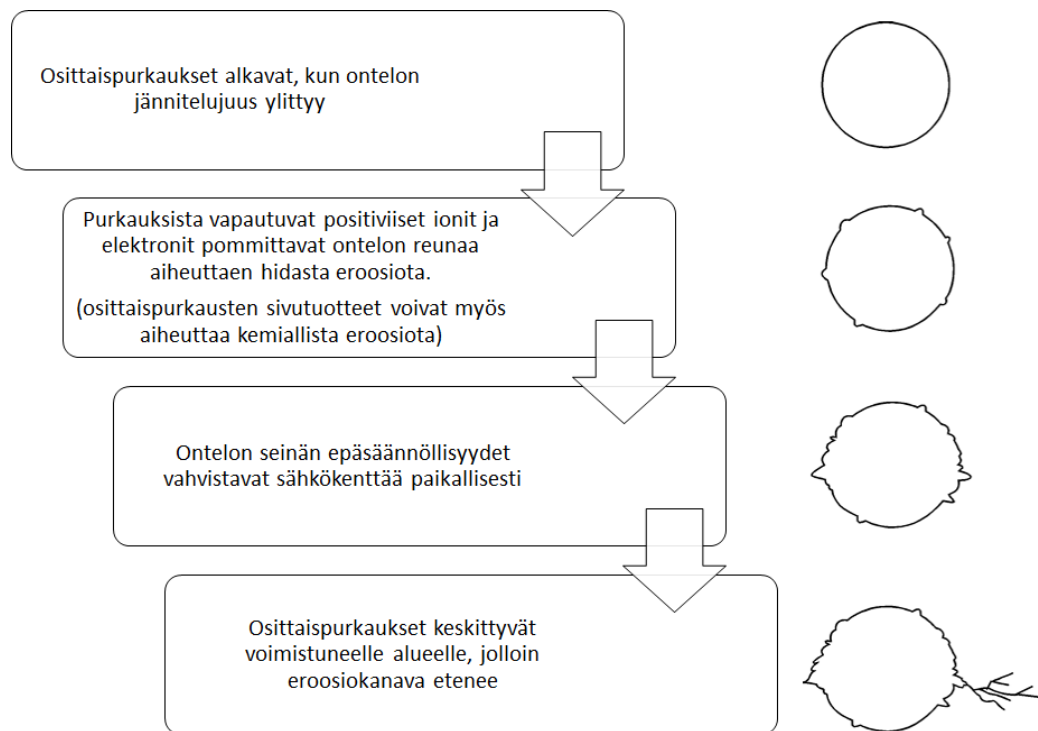
Kuva 2.2. Osittaispurkauksilla alttiita vikapaikkoja a) terävässä kärjessä ja b) pienessä epätasaisuuspisteessä muuten tasaisella pinnalla. [10]

Vaikka sähköpurkaukset on ilmiönä tunnettu jo pitkään, purkauksen kehittymistä osittaispurkauksesta täydelliseksi yli- tai läpilyönniksi ei vielä täysin ymmärretä. Kokemuksesta kuitenkin tiedetään, että eristysrakenteissa kehittyviin vikoihin liittyy usein osittaispurkauksia ja ne voivat heikentää eristeen kuntoa useita vuosia ennen kuin eriste lopullisesti tuhoutuu. [4]

Osittaispurkauksilla on merkittävä vaikutus eristeen kuntoon, sillä osittaispurkaukset aiheuttavat monenlaisia kemiallisia ja fysikaalisia vaikutuksia. Purkaukset aiheuttavat esimerkiksi eroosiota, syövyttäviä yhdisteitä, radiohäiriöitä ja ultraviolettisäteilyä. Ajan kuluessa on mahdollista, että vika etenee osittaispurkauksen aiheuttaman eroosion vaikutuksesta aina elektrodilta elektrodille etenevään täydelliseen purkaukseen, mikä suurjännitelaitteiden tapauksessa on yleensä katastrofaalinen ja vaarallinen tapahtuma. [4]

On vaikeaa ennustaa, kuinka kauan lopulliseen vikaantumiseen menee aikaa. Kyse voi olla muutamista päivistä kymmeneen vuosiin – tai se ei tapahdu laitteen käyttöaikana. Purkausten merkitys on suurin vaihtojännitteillä, jolloin purkaukset toistuvat joka jaksolla ja siten jatkuvasti rasittavat eristysrakennetta edellä mainituin vaikutuksin. Vaikka osittaispurkaukset ovat suhteellisen pieniä, niistä aiheutuvan jatkuvan rasituksen vuoksi ne ovat yksi merkittävimmistä eristysrakenteen kuntoa heikentävistä tekijöistä. Rasittunut eristysrakenteen saattaa kestää normaalin käyttöjännitteen, mutta ei ylijännitteitä tai vaikkapa termistä rasitusta. [4, 8, 11, 12]

Kun osittaispurkaukset ovat alkaneet, niiden voimakkuus ja esiintymistiheys yleensä kasvavat ajan myötä, ja siten purkaukset heikentävät eristyksen kuntoa edelleen, mikä lisää edelleen osittaispurkausten intensiteettiä. Osittaispurkaukset ovatkin progressiivinen vikamuoto, jonka vaiheet on ontelopurkauksen tapauksessa esitetty alla olevassa kuvassa 2.3.



*Kuva 2.3. Osittaispurkauksen eteneminen ontelossa. [10]*

Käytännössä on lisäksi havaittu, että osittaispurkausten intensiteetti laskee voimakkaasti juuri ennen kiinteän eristyksen täydellistä tuhoutumista. Tämä on seurausta siitä, että sisäiset purkaukset muodostavat osittain johtavan pinnan tai kalvon, jota pitkin varaukset pystyvät siirtymään, mikä hetkellisesti vähentää purkauksia. [13] Ilmiö voi toistua myös useamman kerran vikaprosessin aikana. [8] Kun eroosiokanava etenee eroosion myötä yhdistäen elektrodit, syntyy lopullinen tuhoisa läpilyönti.

Eristysmateriaali vaikuttaa siihen, kuinka herkkä eristys on osittaispurkauksille. Esimerkiksi polyetyleenit kuten XLPE ovat herkkiä osittaispurkauksille, eikä niissä voida sallia merkittäviä purkauksia. Toisaalta eräät muut eristeet kuten lasi, posliini ja epoksi kestävät suuriakin osittaispurkauksia. [4, 14] Eräässä prespaanin osittaispurkauskestävyyttä käsittelevässä tutkimuksessa [15] todettiin prespaanin kestävän tunnin kuormituksessa noin 15 000 pC:n osittaispurkauksia. Tämän ohjeellisen raja-arvon ylittäminen vain 1–10 minuutin ajaksi laski selvästi prespaanin eristeominaisuuksia. Siten osittaispurkausten vakavuutta arvioitaessa on otettava huomioon purkauksen voimakkuuden, esiintymistiheyden ja kestoajan lisäksi paikka ja materiaali, jossa osittaispurkaukset tapahtuvat.

## 2.2 Osittaispurkaustyyppit

Eri osittaispurkaustyyppien tunteminen on tärkeää, sillä toiset purkaustyypeistä ovat selvästi haitallisempia ja vaarallisempia kuin toiset. Esimerkiksi muuntajan öljypaperissa tapahtuvat osittaispurkaukset voivat johtaa kalliin ja tärkeän muuntajan täydelliseen tuhoutumiseen. Toisaalta muuntajan yläpuolisissa johtimissa esiintyvät koronapurkaukset ovat aivan normaali ilmiö, josta ei tarvitse huolestua. Luokittelemalla osittaispurkaushavainnot eri tyyppeihin voidaan arvioida purkaushavainnon vakavuutta.

Osittaispurkauksia esiintyy tasa-, vaihto- ja syöksyjännitteillä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä eristeissä sekä rajapinnoilla. Osittaispurkaukset tyypillisesti luokitellaan niiden esiintymispaikan perusteella kolmeen eri tyyppiin: sisäisiin purkauksiin eli ontelopurkauksiin, pintapurkauksiin eristeen pinnalla ja koronapurkauksiin johtimen pinnalla. [4] Lisäksi osittaispurkauksien yhteydessä puhutaan usein kahden elektrodin välillä tapahtuvista kipinäpurkauksista, vaikka ne eivät ole määritelmän mukaisia osittaispurkauksia. Seuraavissa alaluvuissa esitellään tarkemmin nämä purkaustyyppit ja niiden tyypillisiä aiheuttajia.

### 2.2.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Sisäiset purkaukset ovat erityisen vaarallisia eristyksen kunnolle, sillä ne kuluttavat eristystä pysyvästi ja niiden havaitseminen on hankalaa. Sisäiset purkaukset esiintyvät eristeen sisällä olevissa kaasuenteloissa, delaminaatiossa tai halkeamissa, joissa sähkölujuus on paikallisesti muuta eristettä heikompi. Ontelot voivat olla peräisin esimerkiksi kaapeleissa käytetyn öljyn vuotamisesta tai valmistusvaiheessa eristykseen päässeistä kaasukuplista. Delaminaatio, eli kerroksellisen materiaalin kerrosten irtoaminen toisistaan, ilmenee esimerkiksi sähkökoneiden laminoiduissa eristyksissä. Halkeamat voivat olla peräisin esimerkiksi asennusvaiheessa tapahtuneista tärähdyksistä tai tuulen aiheuttamasta kiskovärähtelystä. Sisäisiin purkauksiin kuuluvat myös puumaiset purkaukset eli sähköpuut. Sähköpuu voi saada alkunsa esimerkiksi elektrodin pienestä epätasaisuudesta tai eristeen sisällä olevasta epäpuhtaudesta. [2, 16]

### 2.2.2 Pintapurkaukset

Pintapurkaukset syntyvät voimakkaassa eristepinnan suuntaisessa kentässä. Tällaisia purkauksia esiintyy esimerkiksi suurjännitelaitteiden posliini- ja polymeerikuorissa. Eräs tärkeä ja hyvin haitallinen pintapurkauksen muoto on liukupurkaus, joka on voimakas pintapurkaus. Liukupurkauksia esiintyy kahden eristeen rajapinnalla, kun sähkökentällä on riittävän suuri rajapinnan suuntainen komponentti. [4]

Tärkeimmät liukupurkausrakenteet ovat läpivientieristin ja kaapelipääte. Liukupurkaus kuluttaa nopeasti erityisesti orgaanista eristettä, eikä sellaisilla pinnoilla voida sallia merkittäviä pitkäaikaisia liukupurkauksia. Liukupurkaukset muuttavat sähkökentän jakaumaa ja johtavat helposti koko eristysrakenteen ylilyöntiin. Osittaispurkauksina ne voivat aiheuttaa radiohäiriöitä ja vaurioittaa eristeen pintaa. [4]

### 2.2.3 Koronapurkaukset

Korona on osittaispurkaus, joka tapahtuu ilmassa tai muussa kaasussa elektrodin pinnalla. Tyypillisesti korona ilmenee suurjännitteisten osien terävissä kärjissä ja avojohdoilla, mutta purkauksia voi tapahtua myös terävien särmien ympärillä maapotentiaalissa, jos sähkökentänvoimakkuus on suuri ja sähkökenttä on riittävän vääristynyt. [2] Ionisaatioprosessi alkaa suurimman kentänvoimakkuuden kohdasta, kun vapaa elektroni synnyttää keskimäärin uuden elektronin ja positiivisen ionin.

Varauksenkuljettajien erilaisen käyttäytymisen takia koronalle on tyypillistä, että se ilmenee erilaisena positiivisella ja negatiivisella jännitteellä. [17] Negatiivisella jännitteellä purkaukset alkavat lyhyinä ja pieninä Trichel-pulsseina. Jännitettä suurennettaessa pulssitaajuus suurenee, kunnes Trichel-pulssit yhdistyvät hohtopurkaukseksi (*glowing discharge*). Hohtopurkaus on pulssiton tasavirta, jonka suuruus voi olla satoja mikroampeereita. Kun jännitettä edelleen suurennetaan, hohtopurkaus laajenee huiskupurkaukseksi (*streamer*). [4]

Korona on useimmiten harmittomampi ilmiö verrattuna sisäisiin tai pintapurkauksiin, mutta pahimmillaan korona voi peittää alleen muiden merkityksellisempien osittaispurkausten synnyttämät signaalit [17]. Lisäksi koronan synnyttämät sivutuotteet kuten otsoni ja typpihapot voivat kemiallisesti vaurioittaa lähellä sijaitsevia materiaaleja [16].

Tässä diplomityössä käytetään myös käsitettä "öljyssä tapahtuva korona", jolla viitataan terävän kärjen synnyttämiin, öljyssä tai siinä olevissa kaasukuplissa tapahtuviin osittaispurkauksiin.

### 2.2.4 Kipinäpurkaukset

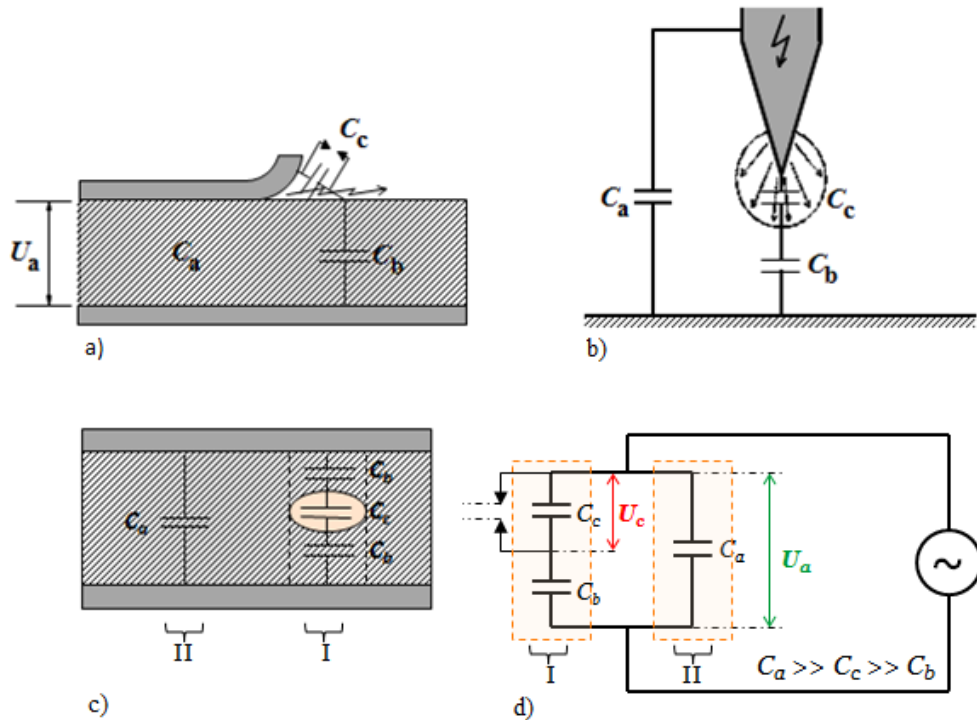
Kipinäpurkaukset eivät ole määritelmän mukaisia osittaispurkauksia, vaan pikemminkin täydellisiä purkauksia, jotka tapahtuvat kahden elektrodin välillä, joista ainakin toinen on kelluvassa potentiaalissa eli galvaanisesti erotettu jännitteestä tai maapotentiaalista. Kipinävälissä tapahtuu purkaus, kun elektrodivälin jännitekestoisuus ylittyy ja purkaus sammuu itsestään, kun jännite-ero elektrodien välillä tasaantuu. Kelluvan elektrodin varaus riippuu sitä ympäröivästä sähkökentästä, elektrodivälin kapasitanssista ja elektrodin maakapasitanssista. Kipinähäiriöitä aiheuttaa muun muassa erilaisten kontaktipintojen hapettumisen ja likaantumisen aikaansaama suuri ylimenovastus, jonka yli purkaukset tapahtuvat. [2]

Kipinäpurkaukset eivät välttämättä aiheuta eroosiota, mutta ne saattavat johtaa silti tuhoisaan läpilyöntiin. Esimerkiksi yksi Fingridin päämuuntajan tuhoutuminen sai alkunsa käämikytkimen hohtosuojan ja sitä liian lähellä olleen maadoitetun tukirakenteen välisestä kipinäinnistä. Kipinäointi synnytti öljyyn kaasukuplia, jotka kulkeutuivat yläjännitepuolen läpivientierioön aiheuttaen riittävän sähkökentän vääristymän, joka edelleen johti sisäiseen läpilyöntiin normaalilla käyttöjännitteellä. [8]



### 2.3 Osittaispurkauksen syntyminen

Osittaispurkauksiin liittyviä perusilmiöitä ja -suureita voidaan havainnollistaa ja analysoida yksinkertaisen kolmikapasitanssimallin avulla. Jos tarkastellaan sisäisiä osittaispurkauksia sekä pinta- ja koronapurkauksia, havaitaan että rakenteet voidaan jakaa kolmeen eri hajakapasitanssiin kuvassa 2.4 esitetyllä tavalla. Kuvan malleissa  $C_c$  on osittaispurkausalueen,  $C_b$  sen kanssa sarjassa olevan eristykseen ja  $C_a$  eristykseen loppuosan hajakapasitanssi.



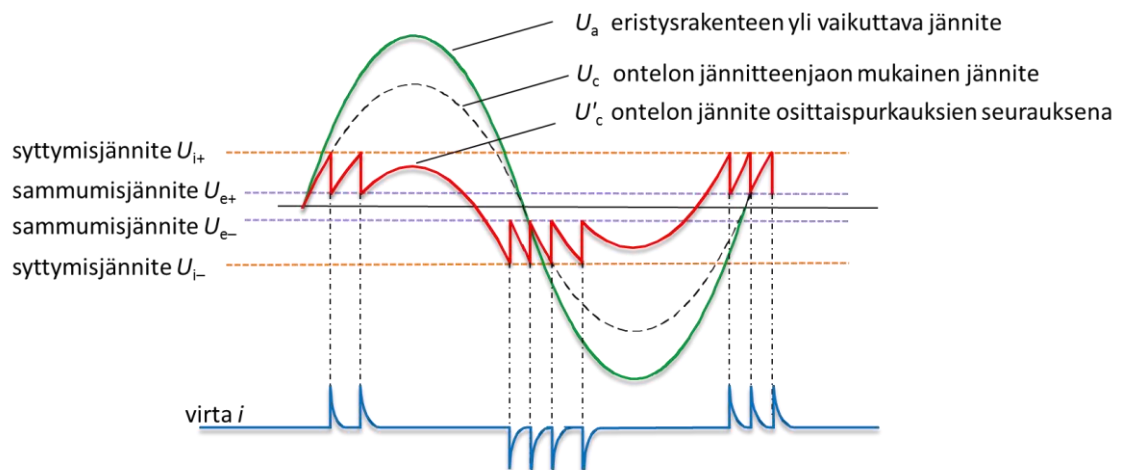
Kuva 2.4. Osittaispurkausrakenteet ja niitä kuvaavat kolmikapasitanssimallit.  
a) Pintapurkaus, b) koronapurkaus, c) ontelopurkaus, d) kolmikapasitanssimalli. [11]

Eristysrakenteeseen vaikuttava vaihtojännite  $U_a$  jakautuu kääntäen kapasitanssien suhteessa ja ontelon jännite  $U_c$  on verrannollinen koko eristysrakenteen jännitteeseen seuraavasti

$$U_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} U_a \quad . \quad (2.1)$$

Tarkastellaan tarkemmin kuvan 2.4c mukaista sisäistä ontelopurkausta. Sähkökentän voimakkuus on ontelossa suurempi kuin ympäröivässä eristeessä. Kun jännitettä suurennetaan, osittaispurkaus syttyy ontelossa syttymisjännitteellä  $U_i$ . Syttymistä seuraava purkaus siirtää osan varauksesta ontelon toiselle seinämälle, jolloin ontelon jännite pienenee ja lopulta sammuu tietyllä sammumisjännitteellä  $U_e$ . Tämä varauksen muutos säilyy seuraavaan uuteen purkaukseen asti, koska eristeen johtavuus on pieni. Purkauksen sammumisen jälkeen ontelon jännite alkaa seurata alkuperäisen kapasitiivisen jännitejaon mukaista vaihtojännitteen käyrää korjattuna varauksen muutosta vastaavalla syttymisjännitteen suuruudella tasajännitekomponentilla.

Tapahtumasarja on esitetty kuvassa 2.5, jossa on merkitty vihreällä eristysrakenteen yli vaikuttavaa jännitettä  $U_a$ , katkoviivalla ontelon alkuperäistä jännitteenjakoa vastaavaa jännitettä  $U_c$  ja punaisella ontelon jännitettä  $U'_c$  ontelopurkauksien aikana. Kuvasta nähdään, että osittaispurkaus näkyy eristysrakenteen liittimissä virtapulssina. Virtapulssi tuo energiatasapainon säilyttämiseksi eristysrakenteeseen yhtä suuren energian kuin purkauksessa on poistunut. Kuvasta nähdään myös, että purkausten tiheys on suurin, kun jännitteen muutosnopeus on suurin. [4]



*Kuva 2.5. Ontelon jännite ja virtapulssit osittaispurkauksien seurauksena. Kun punaisella merkitty ontelon jännite  $U'_c$  saavuttaa syttymisjännitteen  $U_i$ , tapahtuu osittaispurkaus, joka näkyy virtapulssina. [11]*

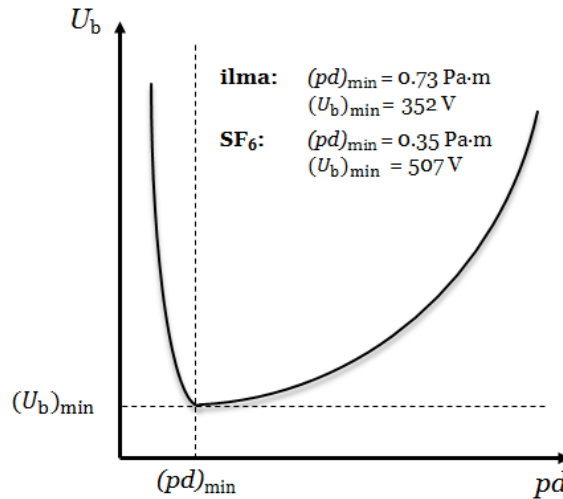
Osittaispurkauksia voi esiintyä myös ontelon syttymisjännitettä pienemmillä jännitteillä. Kun syttymisjännite on kerran ylitetty, esimerkiksi hetkellisen ylijännitteen seurauksena, ja purkaus on syttynyt, purkaukset voivat jatkua. Osittaispurkaukset esiintyvät säännöllisesti toistuvina ryppäinä, jos syttymis- ja sammumisjännitteet ovat yhtä suuret molemmilla polariteeteilla. Jos syttymisjännitteet ovat erisuuret eri puolijaksoilla, purkaukset ovat epäsäännöllisempiä. Epäsäännöllisyys voi johtua myös muista syistä, esimerkiksi suurissa onteloissa voi tapahtua purkauksia eri puolilla onteloa. Useat ja erilaiset ontelot lisäävät purkausten lukumäärää, erilaisuutta ja esiintymistiheyttä. [4]

## 2.4 Ympäristöolosuhteiden vaikutus osittaispurkausilmiöihin

Suurjännitelaitteiden eristykset ovat alttiita erilaisille ympäristötekijöille, jotka vaikuttavat osittaispurkausten ilmenemiseen. Sisäisten osittaispurkausten kannalta merkittävin tekijä on eristyksen lämpötila, mutta sen vaikutus ei ole yksiselitteinen. Korona- ja pintapurkauksien esiintymiseen puolestaan vaikuttavat erityisesti sade, lumi ja epäpuhtaudet. [18] Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan näitä ilmiöitä yksityiskohtaisemmin. Tarkoituksena on ymmärtää, missä olosuhteissa pystytään maksimoimaan mahdollisuudet erottaa vaaralliset sisäiset osittaispurkaukset vähemmän haitallisista ulkoisista purkauksista.

### 2.4.1 Lämpötilan vaikutus sisäisiin osittaispurkauksiin

Eristeen sisältämän kaasuontelon osittaispurkausten syttymisjännite voidaan ennustaa melko hyvällä tarkkuudella Paschenin lain avulla. [4, 18] Laki antaa kaasueristeisen homogeenisen elektrodivälin läpilyöntilujuuden vakioämpötilassa ja se on voimassa vain niissä olosuhteissa, joissa läpilyönti tapahtuu Towsendin esittämällä mekanismilla. Kuvassa 2.6 havainnollistetun Paschenin lain mukaan läpilyöntijännite  $U_b$  on vain kaasun paineen  $p$  ja elektrodien välisen etäisyyden  $d$  funktio. [4]



Kuva 2.6. Paschenin käyrän periaatteellinen kulku. [11]

Paschenin käyrän periaatteellisen kuvan 2.6 perusteella nähdään, että ontelon syttymisjännite kasvaa liikuttaessa käyrän minimin oikean puoleisella osalla, jos kaasun paine tai elektrodiväli kasvaa. Sekä paine että elektrodiväli ovat lämpötilan funktioita. Lämpötilan ja ontelon tilavuuden vaikutusta ontelon kaasun paineeseen kuvaa yleinen kaasun tilanyhtälö

$$\frac{pV}{T} = k, \quad (2.2)$$

missä  $T$  on lämpötila,  $V$  on ontelon tilavuus,  $p$  on ontelon kaasun paine ja  $k$  on vakio. Yhtälön (2.2) perusteella lämpötilan nousu kasvattaa ontelossa olevan kaasun painetta, mikäli kaasu ei pääse poistumaan ontelosta. Painetta voivat lisätä myös osittaispurkauksien synnyttämät kaasumaiset purkaustuotteet. Paineen kasvun seurauksena läpilyöntijännite suurenee.

Lämpötilan vaikutusta onteloa ympäröivän eristeaineen tilavuuteen  $V_e$  voidaan kuvata tilavuuden lämpölaajenemisyhtälöllä

$$\Delta V_e = \beta \Delta T V_{e0}, \quad (2.3)$$

missä  $\beta$  on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin,  $V_{e0}$  on eristeaineen alkuperäinen tilavuus ja  $\Delta T$  on lämpötilan muutos. Yhtälön (2.3) perusteella onteloa ympäröivän eristeaineen lämpölaajeneminen supistaa ontelon tilavuutta, jolloin paine kasvaa

edelleen yhtälön (2.2) perusteella, mikä suurentaa läpilyöntijännitettä. Toisaalta eristeaineen lämpölaajenemisesta johtuva ontelon tilavuuden supistuminen myös lyhentää elektrodiväliä  $d$ , jolloin läpilyöntijännite vuorostaan pienenee. [18]

Jos ontelon kaasun paine on kääntäen verrannollinen ontelon elektrodivälin pituuteen, niiden vaikutukset kumoavat toisensa, eikä lämpötilan muuttumisella ole merkitystä. Tällainen tilanne on kuitenkin harvinainen, eikä eristeaineissa purkausten syttymisjännitteeseen vaikuttavat vastakkaiset tekijään kokonaan kumoa toistensa vaikutusta, vaan lämpötilan muuttuminen muuttaa myös syttymisjännitettä. [18]

Lämpötila voi vaikuttaa osittaispurkausten ilmenemiseen myös muiden monimutkaisempien vuorovaikutusten kautta. Eräässä kosteuden ja lämpötilan vaikutusta öljypaperieristykseen osittaispurkaustasoon käsittelevässä tutkimuksessa [19] todettiin, että osittaispurkausten määrä ja voimakkuus kasvoivat lämpötilan kasvaessa. Lämpötilassa 140–145 °C eristeöljyyn alkoi kuitenkin kehittyä kaasukuplia, jolloin maksimiosittaispurkaustaso laski. Käytännössä öljypaperieristeiden lämpötila on huomattavasti matalampi, ellei kyseessä ole terminen vika tai mitoitusvirhe [8].

Lämpötilan vaikutus sisäisiin osittaispurkauksiin riippuu siis useista eri tekijöistä. Esimerkiksi yksinkertaisen ontelon tapauksessa vaikuttavia tekijöitä on ympäröivän eristeaineen lämpölaajeneminen, onteloiden sisältämä kaasun paine sekä ontelon seinämien huokoisuus. Riippuen siitä, mikä näistä tekijöistä on määräävä, voi lämpötilan kasvu pienentää tai suurentaa purkausten syttymisjännitettä tai sen vaikutus voi olla merkityksetön. [18]

#### **2.4.2 Veden ja lumen vaikutus koronapurkauksiin**

Vesi on pääsyyllinen koronan esiintymiseen, kun lämpötila on nollan yläpuolella. Jo pienikin ilman sisältämä vesimäärä vaikuttaa huomattavasti koronapurkauksien esiintymiseen, sillä vesi aiheuttaa koronan syttymisjännitteen alenemisen ja voimakkaita purkauksia. Joissain tapauksissa sumu tai usva voi kuitenkin muuttaa johtimen pinnan epätasaisuudet johtaviksi, ja siten ehkäistä koronaa. [18]

Tilanne muuttuu, kun lämpötila laskee nollan alapuolelle ja vesi jäätyy. Lumi- ja jääpeite aiheuttavat hohtopurkauksia positiivisella puolijaksolla ja Trichel-purkauksia negatiivisella puolijaksolla. Ne eivät aiheuta merkittäviä radiohäiriöitä, koska jään ja kuivan lumen ominaisvastus on suuri, jolloin osittaispurkausvirrat jäävät pienemmiksi kuin vedellä. [18] Toisaalta Suomen talviolosuhteissa toteutetussa Kangasalan sähköaseman radiohäiriö- ja äänitasojen pitkäaikaiskartoituksessa todettiin, että suurimmat koronan synnyttämät radiohäiriökentänvoimakkuudet aiheutuivat juuri lumen, huurteen tai näiden yhteisvaikutuksesta. [7]

### 2.4.3 Ympäristötekijöiden vaikutus pintapurkauksiin

Vesi, lumi- ja jääpeite sekä ilman epäpuhtaudet vaikuttavat käytännössä samalla tavalla läpivientien ja eristimien purkauksiin kuin koronaankin. Lumi ja jää muuttavat jännitejakaumaa eristimien yli ja aiheuttavat purkauksia, kun sähkökentät vääristyvät riittävästi. Pahin tilanne syntyy lumen tai jään sulaessa, jolloin eristimien pinnalla vuorottelevat suuren vastuksen omaavat kuivat kerrokset ja hyvin johtava sulamisvesi.

Myös johtava lika yhdessä kosteuden kanssa muuttaa eristinten jännitejakaumaa. Kuivien ja märkien alueiden reunoilla esiintyy purkauksia, jotka voivat johtaa läpilyönteihin kuivien alueiden yli. Kun kuivat alueet kasvavat purkausten ja vuotovirtojen lämmittävän vaikutuksen vuoksi, läpilyönnit muuttuvat huisku- ja hohtopurkauksiksi. Purkaukset häviävät, kun likakerros on kokonaan kuiva. [18]

### 2.5 Osittaispurkauksien suureet

Osittaispurkauksia ja niiden vaikutusta voidaan konkretisoida tarkastelemalla yksittäistä purkausta, purkausten aiheuttamia pulssijonoja tai integroituja suureita kuten kokonaisenergiaa tai tehoa. Erilaiset suureet voidaan luokitella perus- ja laskennallisiin suureisiin. Perussuureista johdettuja laskennallisia suureita voidaan käyttää edelleen osittaispurkausten tyyppin tunnistamiseen.

Osittaispurkauksessa siirtyvä varaus olisi luonnollisin ja selkein mitta yksittäisen purkauksen suuruuden mitaksi, sillä vian suuruus ja eristuksen heikentyminen ovat verrannollisia purkauksen suuruuteen. Siirtyvää varausta ei kuitenkaan pystytä mittaamaan, joten sen vuoksi eristysrakenteen liittimissä näkyvä varauksen muutos eli osittaispurkauksen näennäisvaraus on valittu osittaispurkauksen suuruuden mitaksi. [4]

Standardi IEC 60270 [9] määrittelee näennäisvarauksen  $q$  seuraavasti:

- Osittaispurkauksen virtapulssin näennäisvaraus on se yksinapainen varaus, joka tuotuna hyvin lyhyen ajan sisällä koekappaleen liittimiin tietyssä testauskytkennässä antaisi saman mittauslaitteen näyttämän kuin osittaispurkauksen virtapulssi itse. Näennäisvarauksen mittayksikkönä käytetään tavallisesti pikocoulombia (pC).

Vaikka näennäisvaraus ei ole samansuuruinen kuin todellinen osittaispurkauksessa siirtyvä varaus, niin se on kuitenkin verrannollinen purkauksen tehoon ja energiaan sekä vian suuruuteen. Onkin voitu osoittaa, että osittaispurkauksen haitallisuus riippuu voimakkaasti näennäisvarauksen suuruudesta. Näennäisvarauksen käytön suurin haittapuoli on se, että ontelossa tapahtuvalla purkauksella näennäisvaraus on verrannollinen koko eristysrakenteen paksuuteen. Tämän seurauksena ohuella eristysrakenteella purkaus näyttää suuremmalta kuin paksulla. [4]

Osittaispurkausten merkitystä ja voimakkuutta voidaan kuvata myös purkausten syttymis- ja sammumisjännitteillä, jotka määritellään standardissa IEC 60270 seuraavasti:

- Syttymisjännitteellä  $U_i$ , tarkoitetaan sitä eristysrakenteeseen vaikuttavaa jännitettä, jolla havaitaan ensimmäisen kerran toistuvia tietyn suuruisia osittaispurkauksia, kun jännitettä suurennetaan vähitellen.
- Sammumisjännitteellä  $U_e$ , tarkoitetaan sitä eristysrakenteeseen vaikuttavaa jännitettä, jolla toistuvia tietyn suuruisia osittaispurkauksia ei enää esiinny, kun jännitettä lasketaan vähitellen.

Näiden edellä mainittujen suureiden lisäksi osittaispurkauksia voidaan kuvata seuraavien suureiden avulla:

- purkausten lukumäärä  $N$  aikayksikössä,
- purkauksen vaihekulma  $\phi_i$ ,
- purkauksen synnyttämä radio häiriöjännite  $U_{RIV}$  ja
- purkauspulssin taajuusspektri  $A(f)$ .

Näistä yllä esitetyistä perussuureista voidaan muodostaa erilaisia johdannaissuureita, jotka kuvaavat esimerkiksi osittaispurkauksien energiaa, tehoa tai jakaumia. Tällaisia johdettuja suureita ovat esimerkiksi:

- keskimääräinen purkausvirta jakson  $T$  aikana  $I = \frac{\sum |q_i|}{T}$
- purkauksen teho  $P = \frac{\sum q_i u_i}{T}$
- purkausten neliöarvo  $D = \frac{\sum q_i^2}{T}$ .

Integroitujen suureiden merkitystä pienentää se, että harvat suuret ja useat pienet purkaukset voivat antaa saman keskimääräisen purkausvirran, tehon tai neliöarvon. Tästä syystä on usein mielekästä tarkastella purkauksien tilastollisia jakaumia, jotka antavat yksityiskohtaisempaa tietoa purkauksista. Esimerkkejä tilastollisista jakaumista ovat laajalti käytetyt

- pulssien lukumäärä vaihekulman funktiona  $H_n(\varphi)$  ja
- keskimääräinen pulssikorkeus vaihekulman funktiona  $H_{qn}(\varphi)$ .

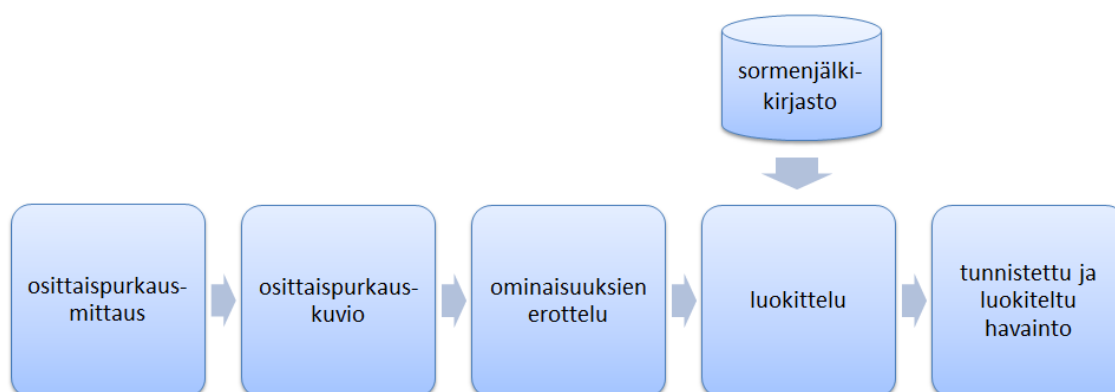
Tilastollisista jakaumista voidaan edelleen laskea tilastollisia suureita, jotka kuvaavat jakauman ominaisuuksia. Tilastolliset suureet kuitenkin kadottavat aika- ja vaiheriippuvuuden, joten paras kokonaiskuva osittaispurkauksesta saadaan tarkastelemalla eri suureita rinnakkain. [4]

## 2.6 Osittaispurkauksien tunnistaminen ja arviointi

Erilaisten osittaispurkausmittausten tarkoitus on tuottaa tietoa eristysten senhetkisestä kunnosta. Osittaispurkauksen havaitseminen itsessään ei ole vielä merkityksellistä, sillä pelkän havainnon pohjalta ei voida päättää kunnossapidosta. Jotta mittauksista saatavaa tietoa pystyttäisiin hyödyntämään päätöksenteossa, mittauksista saatavaa tietoa on pystyttävä tulkitsemaan ja arvioimaan. Kuten luvussa 2.2 todettiin, osittaispurkauksen vaarallisuus riippuu osittaispurkauksen tyypistä ja eristysrakenteesta, jossa purkaus tapahtuu. Erityisen tärkeitä onkin pystyä yhdistämään eri eristerakenteiden ominaispiirteet ja osittaispurkausmittausten tulokset, jotta vaaralliset purkaushavainnot voidaan erottaa vaarattomista purkauksista.

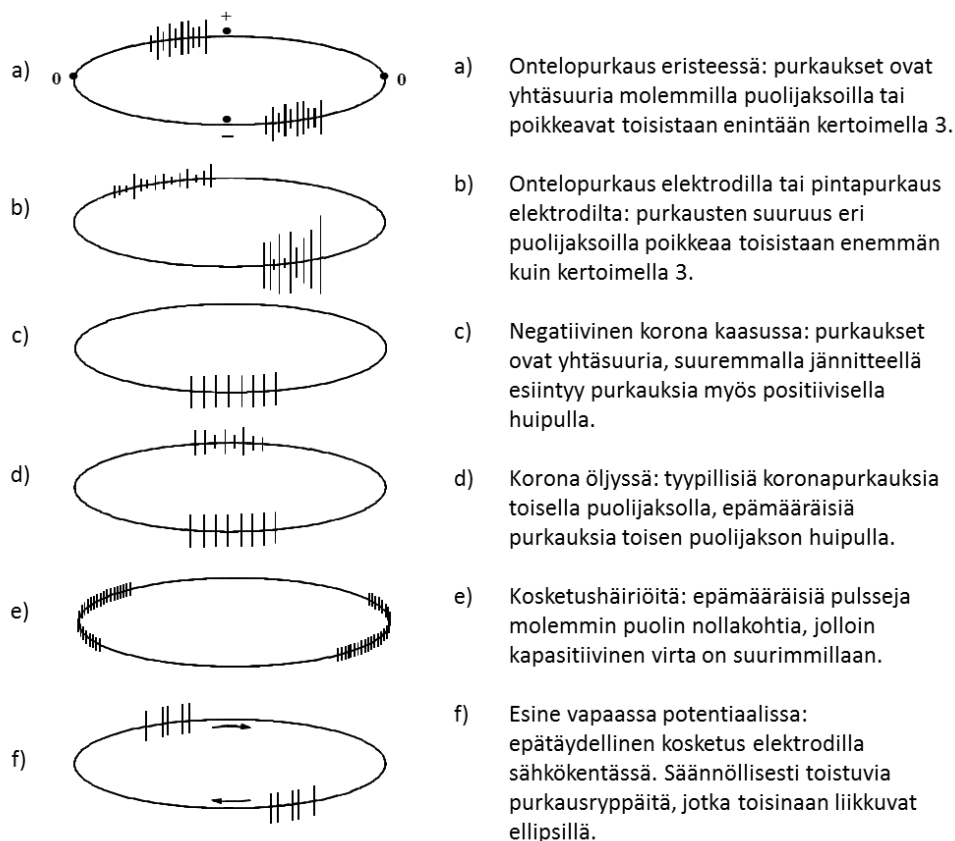
Mittaustulosten ja eristerakenteiden ominaispiirteiden yhdistämisen ja luokittelun tuloksena pyritään saamaan aikaan niin sanottuja sormenjälkiä (*fingerprints*) ja sääntöjä (*knowledge rules*). Tarkoituksena on lopulta saada aikaan sormenjälkikirjasto, joka sisältää erilaisten purkaustyyppien tyypilliset mittaustulokset ja päättelysäännöt, joiden avulla tulevia osittaispurkausmittauksia pystyttäisiin analysoimaan nopeasti ja helposti. [20]

Yleinen osittaispurkauksen luokitteluprosessi on esitetty kuvassa 2.7. Osittaispurkausmittaus voidaan tehdä monilla eri tavoilla, esimerkiksi mittaamalla näennäisvarausta, sähkömagneettista säteilyä tai akustisia aaltoja. Näiden mittausten tuloksista ja niistä lasketuista suureista muodostuu erilaisia purkaukkuvia (*discharge patterns*). Näistä kuvioista pyritään erottamaan ominaisuuksia (*features*), jotka kuvaavat erilaisten purkauksen synnyttämiä tyypillisiä jälkiä. Ominaisuudet perustuvat yleensä aikaisempaan kokemukseen, teoreettiseen näkemyskseen tai intuitioon. Luokittelun tarkoitus on verrata tuntemattomasta osittaispurkausmittauksesta saatuja ominaisuuksia aiempiin tunnettujen osittaispurkauksen ominaisuuksiin. Onnistuneen luokittelun tuloksena on mahdollista tunnistaa mitatun osittaispurkauksen tyyppi ja siten arvioida purkauksen vakavuutta, ja edelleen sen perusteella päättää kunnossapidosta. [21]



Kuva 2.7. Yleinen luokitteluprosessi osittaispurkauksen tunnistamiseksi.

Tällaisen sormenjälkikirjaston ja luotettavan luokittelun aikaansaamiseksi on tehty paljon tutkimus- ja kehitystyötä alan yrityksissä ja yliopistoissa. Perinteisesti luokittelu on tehty tarkastelemalla purkauspulssien jakautumista vaihekulman funktiona kuvan 2.8 esittämällä tavalla.

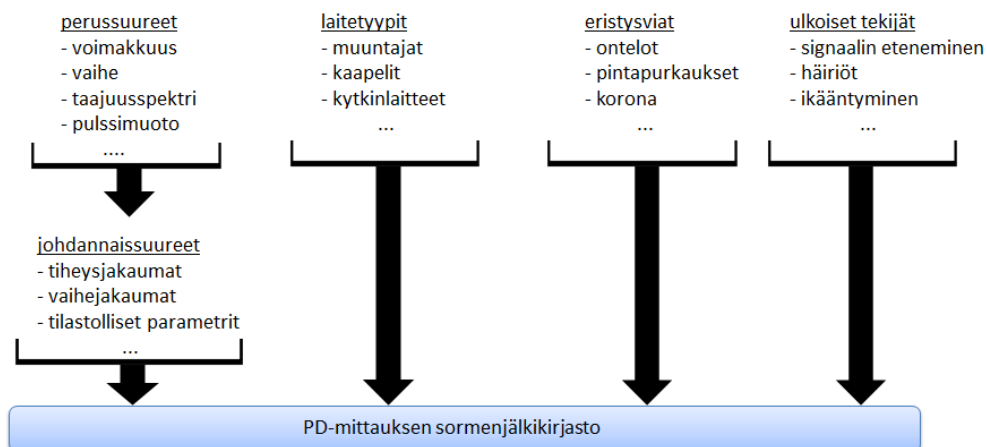


Kuva 2.8. Osittaispurkausten tunnistaminen tarkastelemalla purkausten jakautumista vaihekulman funktiona. [4]

Tulkinnan laatu on kuitenkin riippuvainen tarkastelijan kokemuksesta ja osaamisesta. Tietotekniikan ja sitä myöten datan käsittelyn tehostumisen ansiosta on pystytty ottamaan käyttöön uusia monimutkaisempia menetelmiä. Luokitteluun on nykyisellään käytettävissä suuri määrä erilaisia tekniikoita, kuten perinteiset ja sumeat luokittelijat, neuroverkot sekä klusteri- ja pääkomponenttianalyysi. On kuitenkin ymmärrettävä, että vain yhtä parasta luokittelumenetelmää ei voida nimetä. [21]

Toinen keskeinen johtopäätös näissä tutkimuksissa on se, että näköpiirissä ei ole mitään universaalia aukotonta osittaispurkausten luokittelukonetta, vaan luokittelujärjestelmä täytyy kehittää tapauskohtaisesti testauksen kohteena olevalle laitetypille. [14] Sormenjälkikirjastoa ei pidäkään ajatella rajatusti ominaisuusjoukkona, joka automaattisesti pystyy määrittämään purkaustyyppin pelkkien mittaussuureiden perusteella. Asiaa täytyy tarkastella kuvan 2.9 esittämällä tavalla laajemmasta näkökulmasta ottamalla huomioon erilaiset laitetypit, niiden eristysrakenteet ja eristysviat sekä ulkoiset tekijät.





*Kuva 2.9. Sormenjälkikirjaston muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä.*

Lisäksi täytyy pitää mielessä, että osittaispurkausmittauksia voidaan tehdä kahdesta eri syystä: joko tarkan vikatyypin määrittämiseksi tai vikaepäilyjen seulomiseksi suuresta laitepopulaatiosta. Jälkimmäisessä tapauksessa riittää, että mittauksesta saadaan suuntaa antava vikatyypin, minkä jälkeen vikakohteelle voidaan kohdistaa muita tarkentavia diagnostisia mittauksia, mikäli ensimmäinen havainto viittaa haitalliseen osittaispurkaustyyppiin.

### 3 Osittaispurkausten synnyttämä sähkömagneettinen säteily

*Tässä luvussa tarkastellaan osittaispurkauksien synnyttämää sähkömagneettista säteilyä. Käytännön mittauksia ajatellen on tiedettävä, mitkä säteilyn etenemiseen liittyvät tekijät vaikuttavat saatuihin mittaustuloksiin. Luvun alussa tarkastellaan säteilyn syntymistä, etenemistä ja vaimentumista. Luvun lopussa esitetään säteilyn mittaamista ja heijastumia avoimessa tilassa.*

#### 3.1 Syntymekanismi

Sähkömagneettinen säteily syntyy varauksien muuttuvasta liikkeestä, esimerkiksi pulssimaisista purkauksista. Kiihtyvä, hidastuva, sinimuotoinen tai mikä tahansa muu varausten liike, joka ei ole suoraviivaista ja tasanopeuksista, johtaa sähkömagneettiseen säteilyyn. Tämä voidaan todeta tarkastelemalla Maxwellin yhtälöitä

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{\delta \vec{B}(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \vec{J}(t) + \frac{\delta \vec{D}(t)}{dt}, \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(t) = \rho, \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(t) = 0 \quad (3.4)$$

sekä väliaine yhtälöitä

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{ja} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (3.6)$$

missä  $\vec{E}$  on sähkökentän voimakkuus,  $\vec{B}$  on magneettivuon tiheys,  $\vec{H}$  on magneettikentän voimakkuus,  $\vec{J}$  on sähkövirran tiheys,  $\vec{D}$  on sähkövuon tiheys,  $\rho$  on varaustiheys,  $\epsilon$  on väliaineen permittiivisyys ja  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti.

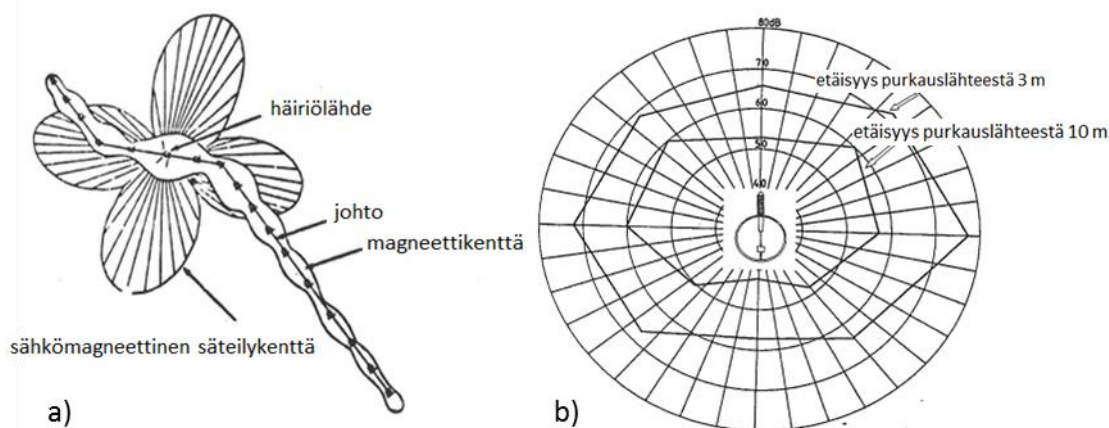
Jos varausten liike on epätasaista, virrantiheyden  $\vec{J}(t)$  aiheuttama magneettikenttä  $\vec{H}(t)$  on ajan funktio yhtälön (3.2) perusteella. Yhtälön (3.1) perusteella magneettivuon tiheyden muutos  $\frac{\delta \vec{B}(t)}{dt}$  synnyttää pyörteisen sähkökentän  $\vec{E}(t)$ , joka on myös ajan funktiona muuttuva. Tämän jälkeen yhtälön (3.2) mukaan sähkövuon tiheyden muutos  $\frac{\delta \vec{D}(t)}{dt}$  aiheuttaa magneettikentän, joka on jälleen ajasta riippuva, jolloin syntyy edelleen muuttuva sähkökenttä ja näin vuorovaikutus jatkuu.

Jos varausten liike olisi alun perin tasaista, se synnyttäisi vakio-magneettikentän. Vakio-magneettikenttä ei kuitenkaan pysty synnyttämään sähkökenttää ja näin ollen sähkömagneettista säteilyä ei synny. [22]

### 3.2 Voimajohdot ja sähköasemakomponentit säteilijöinä

Sähköpurkaukset syntyvät usein komponenteissa, joihin on kytkeytyneinä johtoja tai muita metallirakenteita. Nämä metallirakenteet toimivat antennina ja niiden mitat vaikuttavat osaltaan siihen, millä taajuudella häiriösäteily on voimakkainta. Esimerkiksi sähköaseman kiskot ja alastuloköydet toimivat tällaisina antennirakenteina. Sisäisissä osittaispurkauksissa suora säteily purkauksista on usein heikkoa, koska laitteiden rakenteet ja metallikuoret vaimentavat voimakkaasti sähkömagneettista säteilyä. Häiriösäteily tapahtuu tällaisissa tapauksissa läpivienneistä ja niihin kytketyistä johtimista, jotka toimivat mittojensa mukaisina antennina. [2, 3]

Sähköasemien suurjännitelaitteissa tapahtuvien osittaispurkauksien säteilykuvion arvioiminen on vaikeaa, koska laitteet ja rakennelmat ovat monimutkaisia. Karkean kuvan aiheesta saa kuitenkin tarkastelemalla kuvan 3.1 säteilykuvioita. Kuvassa 3.1 a) on erään johdon säteilykuvio, kun häiriölähde on keskellä suoraa johto-osuutta olevalla pylväällä. Yksittäisen suoran johdon säteilykuvio riippuu varsin voimakkaasti siitä, kuinka pitkä johto on aallonpituuteen nähden ja minkälaiseen impedanssiin johto on päätetty. [3] Kuvan 3.1 b) säteilykuvio on mitattu keinotekoisen purkauskammion ympäriltä. Säteily siirtyi purkauskammion ulos pääasiassa läpivientieristimien kautta. Voimakkain säteily mitattiin läpivientieristimen sivussa, koska läpivienti toimi horisontaalisesti polarisoituneena antennina. Ero läpivientieristimen sivulla ja takana tehdyissä mittauksissa oli noin 20 dB. [2]



Kuva 3.1. a) Voimajohdolla olevan häiriölähteen säteilykuvio [3] ja b) keinotekoisen purkauskammion säteilykuvio. [2]

Sähkömagneettista säteilyä mitatessa myös antennin polarisaatio vaikuttaa mittaustuloksiin. Teoreettinen vaimennus horisontaali- ja vertikaalipolarisaation välillä on noin 20 dB. Horisontaalipolarisoidulla antennilla mitattu vertikaalipolarisoitunut säteily havaitaan siis 20 dB heikompana. Vaakaspuoran voimajohdon säteily on yleensä horisontaalipolarisoitunutta. Sähköasemilla olevissa kiskoissa on yleensä mutkia ja haarautumia, jolloin säteilysuunnat ja polarisaatiot voivat olla epämääräisempiä. Pienillä taajuuksilla myös maan läheisyys vaikuttaa säteilykuvioon. [3]

### 3.3 Säteilyn vaimeneminen

Epätasaisesta varauksen liikkeestä syntyvän sähkömagneettisen aallon etenemis- ja vaimenemisominaisuudet riippuvat sen aineen sähköisistä ja magneettisista materiaaliparametreista, jossa aalto etenee. Tuntemalla keskeiset aaltojen etenemis- ja vaimennusmekanismit, pystytään paremmin ymmärtämään, miten osittaispurkausten synnyttämät sähkömagneettiset aallot käyttäytyvät ja näkyvät antennivastaanottimen avulla tehdyissä mittauksissa.

Häviöttömässä väliaineessa pistelähteestä ulospäin etenevän palloaallon tehotiheys pienenee geometrian vaikutuksesta, kun aallon teho leviää isommalle pallopinnalle. Tällöin puhutaan vapaan tilan vaimennuksesta. Tarkastellaan isotrooppista pistemäistä säteilylähdettä, jonka säteilyteho pinta-alayksikköä kohti ( $\text{W/m}^2$ ) on

$$P_{\text{Di}} = \frac{P_{\text{T}}}{4\pi d^2} , \quad (3.7)$$

missä  $4\pi d^2$  on  $d$ -säteisen pallon pinta-ala ja  $P_{\text{T}}$  on purkauksen säteilyteho.

Käytännössä isotrooppinen, tasaisesti kaikkiin suuntiin säteilevä antenni on kuitenkin mahdoton. Jos säteilijän oletetaan säteilevän tiettyyn suuntaan ja sen vahvistus vastaanottoantennin suuntaan on  $G_{\text{T}}$ , saadaan todelliseksi tehotiheydeksi

$$P_{\text{D}} = P_{\text{Di}} G_{\text{T}} = \frac{P_{\text{T}} G_{\text{T}}}{4\pi d^2} . \quad (3.8)$$

Vastaanottavan antennin sieppauspinta-ala  $A_{\text{e}}$  pystyy sieppaamaan tehon

$$P_{\text{R}} = P_{\text{D}} A_{\text{e}} = \frac{P_{\text{T}} G_{\text{T}}}{4\pi d^2} A_{\text{e}} . \quad (3.9)$$

Sieppauspinta-alan ja maksimisuuntavahvistuksen suhde on kaikilla antenneilla

$$\frac{A_{\text{e}}}{G_{\text{R}}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} , \quad (3.10)$$

missä  $\lambda$  on säteilyn aallonpituus ja  $G_{\text{R}}$  on vastaanottoantennin maksimisuuntavahvistus. Tällöin yhtälöiden (3.9) ja (3.10) perusteella saadaan vastaanotto- ja lähetystehojen suhteeksi

$$\frac{P_{\text{R}}}{P_{\text{T}}} = G_{\text{T}} G_{\text{R}} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 . \quad (3.11)$$

Yhtälö (3.11) on vapaan tilan etenemisen perusyhtälö, josta käytetään myös nimitystä Friisin yhtälö. Kun yhtälöön (3.11) sijoitetaan aalto-opin perusyhtälö

$$\lambda = \frac{c}{f} , \quad (3.12)$$

saadaan vastaanotto- ja lähetystehojen suhteeksi

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{c}{4\pi f d} \right)^2 = G_T G_R \frac{0,57 \cdot 10^{-3}}{(f d)^2} , \quad (3.13)$$

missä  $f$  on säteilyn taajuus (MHz) ja  $d$  on etäisyys säteilylähteestä (km). Yhtälöstä (3.13) nähdään, että säteilyn teho on kääntäen verrannollinen etäisyyden ja taajuuden neliöön. Yhtälö (3.13) saadaan esitettyä vielä havainnollisemmin desibeleinä

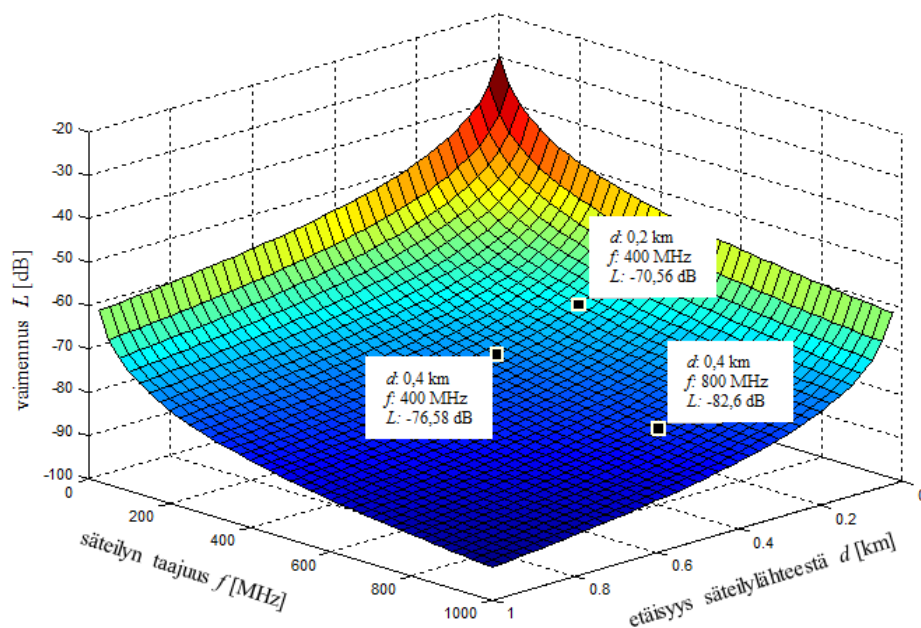
$$\left( \frac{P_R}{P_T} \right)_{\text{dB}} = (G_T)_{\text{dB}} + (G_R)_{\text{dB}} - (32,5 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f) . \quad (3.14)$$

Yhtälön (3.14) loppuosa

$$L = -(32,5 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f) \quad (3.15)$$

kuvaa säteilyn vaimentumista vapaassa tilassa. Yhtälön (3.15) perusteella havaitaan, että etäisyyden tai taajuuden kaksinkertaistuminen aiheuttaa kuuden desibelin vaimentumisen aallon tehossa. [2, 22] Tämän voi todeta myös vapaan tilan vaimennusta esittävästä kuvasta 3.2. Vertaamalla kaksinkertaisella etäisyydellä tai taajuudella toisistaan olevia pisteitä, havaitaan että pisteiden välinen ero on kuusi desibeliä.

Yleisemmin tarkasteltuna nähdään, että signaali vaimenee nopeasti taajuuden ja etäisyyden kasvaessa. Tästä havainnosta on kaksi ilmeistä seurausta radiotaajuisia osittaispurkausmittauksia ajatellen. Osittaispurkauslähde on mahdollista paikantaa etenemällä voimistuvan signaalin suuntaan. Lisäksi korkeammat taajuudet vaimenevat voimakkaammin kuin matalat taajuudet.



Kuva 3.2. Säteilyn vaimeneminen taajuuden ja etäisyyden funktiona.

Jos tarkastellaan aallon etenemistä häviöllisessä väliaineessa, aalto vaimenee vapaan tilan vaimennuksen lisäksi sen takia, että energiaa kuluu materiaan. Häviöteho on verrannollinen etenevään energiaan, minkä vuoksi vaimeneminen on eksponentiaalista ja kentän etäisyysriippuvuus on muotoa

$$e^{-\alpha d}, \quad (3.16)$$

missä  $\alpha$  on materiaaliin liittyvä vaimennuskerroin ja  $d$  etäisyys säteilylähteestä. Eksponentiaaliseen vaimennuksen voimakkuuteen vaikuttaa vaimenemiskertoimen suuruus. Merkittävin ero vapaan tilan vaimennukseen on se, että eksponentiaalinen vaimennus on tietyllä matkalla aina sama desibelimäärä, kun vapaan tilan vaimennus on sama desibelimäärä aina kaksinkertaistetulla etäisyydellä. [22]

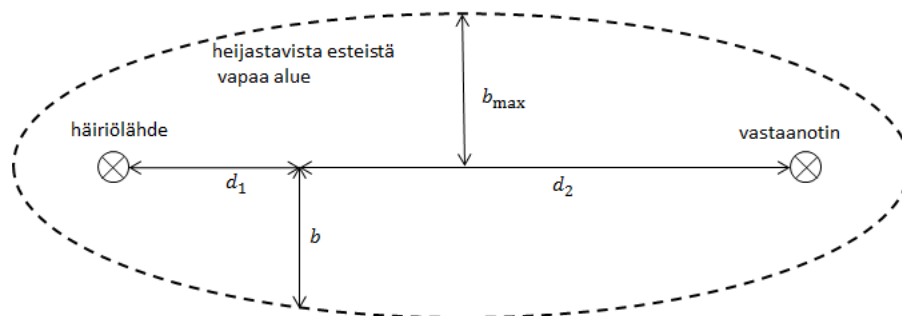
Käytännössä etenemisvaimennuksen laskeminen on hyvin monimutkaista, koska lähtin- ja vastaanotinantennit eivät ole vapaassa tilassa. Säteilylähteen ja vastaanottimen yhteysväli on harvoin vapaa esteistä ja vaikka olisikin, niin vastaanotettuun signaaliin vaikuttavat myös aallon heijastukset ja sironnat. [2]

### 3.4 Säteilyn mittaaminen avoimessa tilassa

Säteilyn mittaamiseen häiritsevästi vaikuttavien heijastusten määrä voidaan minimoida välttämällä peittäviä ja heijastavia esineitä mittapaikan ympäristössä. Mitattavan säteilylähteen ja mittausantennin ympärillä on oltava riittävän suuri esteistä vapaa alue. Radiotekniikassa tästä alueesta käytetään nimitystä ensimmäinen Fresnelin pyörähdysellipsoidi, joka on esitetty kuvassa 3.3. Ellipsoidin toisessa polttopisteessä on häiriölähde ja toisessa vastaanotin. Fresnelin vyöhykkeen säde voidaan laskea yhtälöllä

$$b = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (3.17)$$

missä  $d_1$  ja  $d_2$  ovat etäisyydet vastaanottimesta ja häiriölähteestä siihen Fresnelin vyöhykkeen kohtaan, minkä säde  $b$  halutaan laskea.  $\lambda$  on säteilyn aallonpituus. Mitä suurempi taajuus on, sitä kapeampi Fresnelin säde on. Kuuden metrin etäisyydellä ja 300 MHz:n taajuudella säde  $b_{\max}$  on 1,2 metriä ja 900 MHz:n taajuudella säde on 0,7 metriä. [3, 23]



Kuva 3.3. Avoimen tilan mittauksissa tarvittava heijastavista esteistä vapaa alue, joka on merkitty kuvaan katkoviivalla. Kuvassa  $d_1$  ja  $d_2$  ovat etäisyydet vastaanottimesta ja häiriölähteestä siihen Fresnelin vyöhykkeen kohtaan, minkä säde  $b$  halutaan laskea.

### 3.5 Heijastukset ja sironta

Hyvin harvoin säteilylähteen ja vastaanottimen välinen Fresnelin alue on täysin vapaa heijastavista pinnoista. Tästä syystä vastaanottimeen tulee suoraan edenneen aallon lisäksi maanpinnasta ja rakennuksista heijastuneita aaltoja, mikä voi häiritä osittaispurkausten paikantamista radiotaajuisilla osittaispurkausmittauksilla.

Radioaaltojen heijastuminen noudattaa samoja lakeja kuin valonkin heijastuminen. Kohtisuoraan rajapintaan tulevasta aallosta osa heijastuu ja osa etenee suoraan läpi. Heijastuvan ja rajapinnan läpäisevän säteilyn osuus riippuu väliaineen ominaisuuksista. Hyvän johteen, esimerkiksi metallin, pinnasta teho heijastuu melkein kokonaan. [2, 23]

Vinosti rajapintaan tuleva aalto heijastuu rajapinnasta yhtä suuressa kulmassa kuin, missä aalto saapuu rajapintaan, mutta läpäisevän aallon suunta taittuu. Heijastuneella aallolla on sama aallonpituus ja nopeus kuin rajapintaan saapuvilla aalloilla. Heijastusvaimennuksella tarkoitetaan häviöitä, jotka syntyvät tulevan aallon menettäessä osan energiastaan tasopinnan absorboidessa energiaa ja osan säteilyssä edetessä rajapinnan läpi. [2, 23]

Heijastuminen syntyy vain, kun pinta on tasainen suhteessa aallonpituuteen. Muussa tapauksessa säteily hajaantuu eri suuntiin, eli tapahtuu sironta. Sironnassa osa aallon tehosta muuttuu epäkoherenttiin muotoon ja säteilee laajaan avaruuskulmaan, mikä vaimentaa signaalia. [2, 23]

## 4 RFI-mittausmenetelmä

---

*Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen soveltavassa osuudessa käytettyä RFI-mittausmenetelmää. Luvun alussa esitetään yleisellä tasolla, miten menetelmä eroaa perinteisestä galvaanisesta mittausmenetelmästä ja mitkä ovat menetelmän edut. Tämän jälkeen esitellään, miten menetelmällä voidaan tunnistaa ja paikantaa osittaispurkauslähteitä.*

### 4.1 Mittausmenetelmän esittely

Radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset eli RFI-mittaukset on tunnettu pitkään ja havaittu hyväksi menetelmäksi eristysvikojen paikantamiseen. Westinghouse Electric käytti ensimmäisen kerran radiotaajuisia mittauksia yli 40 vuotta sitten havaitsemaan turbiinigeneraattorin staattorikäänin kipinöintiä, minkä jälkeen useissa tutkimuksissa on osoitettu mittaustekniikan toimivuus ja käyttökelpoisuus eri olosuhteissa. [24]

Sähköverkkoyhtiöissä radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset nousivat esille, kun Ison-Britannian verkkoyhtiö National Gridin muuntaja tuhoutui 1980-luvun alussa rajussa palossa. Sähköaseman lähiasukkaat olivat valittaneet televisio- ja radiohäiriöistä ennen muuntajapalaa, mutta nämä häiriöt loppuivat muuntajapalon jälkeen. Tällöin ymmärrettiin, että radiotaajuuksia seuraamalla voidaan hyvinkin yksinkertaisesti havaita, tunnistaa ja paikantaa osittaispurkauksia. [1] Hyvistä kokemuksista huolimatta RFI-mittaukset eivät ole yhtä laajalti käytetty kunnonvalvontamenetelmä kuin vaikkapa häviökulmamittaukset tai öljyanalyysit.

Osittaispurkausten synnyttämät sähkömagneettiset aallot jakaantuvat laajalle taajuusalueelle kilohertseistä gigahertzeihin. Tyypillisesti kunnonvalvontaan sovellettavissa radiotaajuisissa osittaispurkausmittauksissa käytetään alle 1 GHz:n taajuuksia. Lisäksi on kehitetty myös korkeampaa 0,3–3 GHz:n taajuusaluetta hyödyntäviä UHF-menetelmiä (*ultra high frequency*), joita käytetään esimerkiksi tehomuuntajien ja kaasueristeisten kytkinlaitosten sisäisten osittaispurkausten havainnoinnissa. [4]

Sähkömagneettinen säteily havaitaan antennien avulla ja analysointi voidaan tehdä joko pyyhkäisevällä tai Fourier-muuntavalla spektrianalysaattorilla. Radiotaajuisien osittaispurkausmittausten etu on se, että mittaus voidaan suorittaa ilman galvaanista yhteyttä mitattavaan kohteeseen, mikä mahdollistaa suurjännitelaitteen käytönaikaisen kunnonvalvonnan. Menetelmän herkkyyttä voivat kuitenkin huonontaa mittauspaikalla mahdollisesti esiintyvät sähkömagneettiset häiriöt, jotka täytyy huomioida mittauksia tehdessä ja analysoitaessa. Häiriöitä voidaan vähentää käyttämällä esimerkiksi eri taajuuskaistan antenneja. [4]

Marti Aron et al. mukaan radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset sopivat parhaiten avojohtojen eristysten kunnonvalvontaan ja sähköasemien purkaustilanteen yleiskartoittamiseen, sillä etenkin kytkinlaitoksilla ja muuntoasemilla purkauslähteen tarkka paikantaminen voi tuottaa ongelmia [4]. Toisaalta tutkimuksissa [6, 24] on havaittu, että sähköasemalla sijoitetun useiden yhteen kytkettyjen antennien järjestelmällä voidaan paikallistaa purkauslähte melko tarkasti ja jopa rakentaa



itsenäinen kunnonvalvontajärjestelmä, joka varoittaa asemalla tapahtuvista osittaispurkauksista. Lisäksi National Grid on käyttänyt menetelmää jo yli 20 vuotta sähköasemalaitteiden kunnonvalvonnessa. [1]

RFI-menetelmän soveltuvuudesta sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan ei ole vielä laajamittaista käytännön kokemusta Suomessa. Tampereen teknillisessä korkeakoulussa aihetta on tutkittu 1990-luvun alussa. [2, 3] Radiohäiriömittausten soveltuvuutta kantaverkon sähköasemien kunnonvalvontaan on kokeiltu myös muun muassa Yleisradion ja Tampereen teknillisen yliopiston tekemillä radiohäiriömittauksilla. [7, 8] Nämä tutkimukset ja kokeilut ovat keskittyneet ulkoisten korona- ja kipinäpurkausten tunnistamiseen ja haittoihin nimenomaan radio- ja televisiosignaaleille.

National Grid ja ESBI -verkkoyhtiöiden myönteiset kokemukset RFI-menetelmästä ja erilaiset käytännön syyt ovat nostaneet aiheen jälleen pinnalle kantaverkkoyhtiö Fingridillä. Esimerkiksi mittamuuntajien, läpivientien ja kaapelipäätteiden sisäisten vikojen havaitsemiseen kaivataan joustavia menetelmiä, sillä nykyisin mittamuuntajista ja öljyeristeisistä läpivienneistä ei voida teknisistä ja taloudellisista syistä ottaa säännöllisesti öljynäytteitä, jotka paljastaisivat osittaispurkausviat tehokkaasti. Kaapelipäätteiden osittaispurkaustasoja ei myöskään nykyisin seurata Fingridillä. [8]

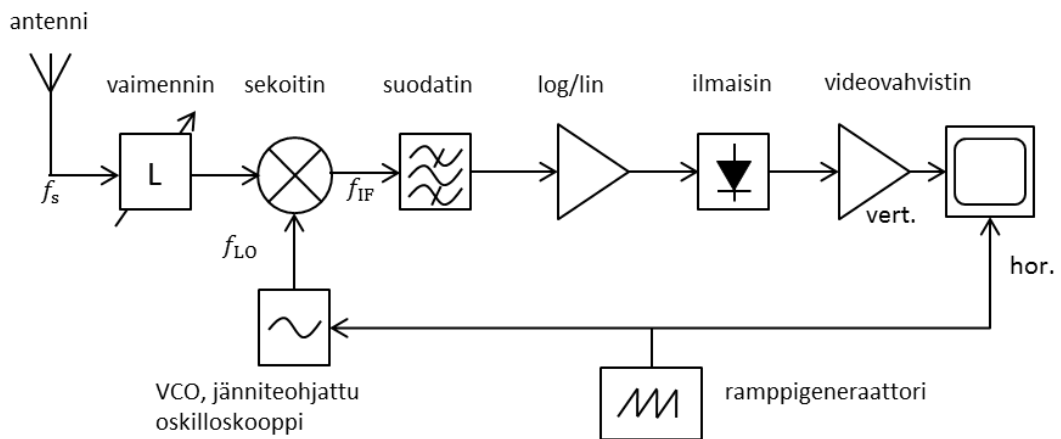
Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten yhtenä heikkoutena on pidetty sitä, ettei niiden avulla voida juurikaan arvioida purkauksen voimakkuutta tai sen aiheuttaman vahingon suuruutta. Ongelma on kuitenkin yhteinen mille tahansa yksittäiselle osittaispurkausmittaustekniikalle, minkä takia uusia eristysten kuntoa ja purkausten vaikutuksia arvioivia menetelmiä tarvitaan. Eräässä tutkimuksessa [25] on tarkasteltu osittaispurkausten näennäisvarauksen ja RFI-menetelmällä mitatun energian välistä korrelaatiota ja havaittu, että niiden välisen suhteen perusteella olisi mahdollista arvioida myös RFI-menetelmällä havaitun osittaispurkauksen voimakkuutta. Todennäköisesti eri tutkimusorganisaatiot ja sähköalan järjestöt kuten CIGRE paneutuvat asiaan lähivuosina. [6]

## 4.2 Impulssipulssimaisten signaalien mittaaminen

### 4.2.1 Pyyhkäisevä spektrianalysaattori ja ilmaisintyypit

Osittaispurkausten havaitseminen on mahdollista spektrianalysaattorin avulla. Modernit pyyhkäisevät RFI-mittalaitteet perustuvat superheterodyne-tekniikkaan, jossa kapea mittaustaajuus pyyhkii jatkuvasti tutkittavan taajuusalueen yli. Kuvassa 4.1 on esitetty tyypillisen pyyhkäisevän spektrianalysaattorin yksinkertaistettu lohkokkaavio. Siinä mitattu signaali sekoitetaan tulovaimentimen jälkeen paikallisen jänniteohjatun oskilloskoopin (VCO, *voltage controlled oscilloscope*) tuottaman siniaallon kanssa, jolloin mitattu signaali siirtyy tietylle välitaajuudelle ( $IF$ , *intermediate frequency*). [23]

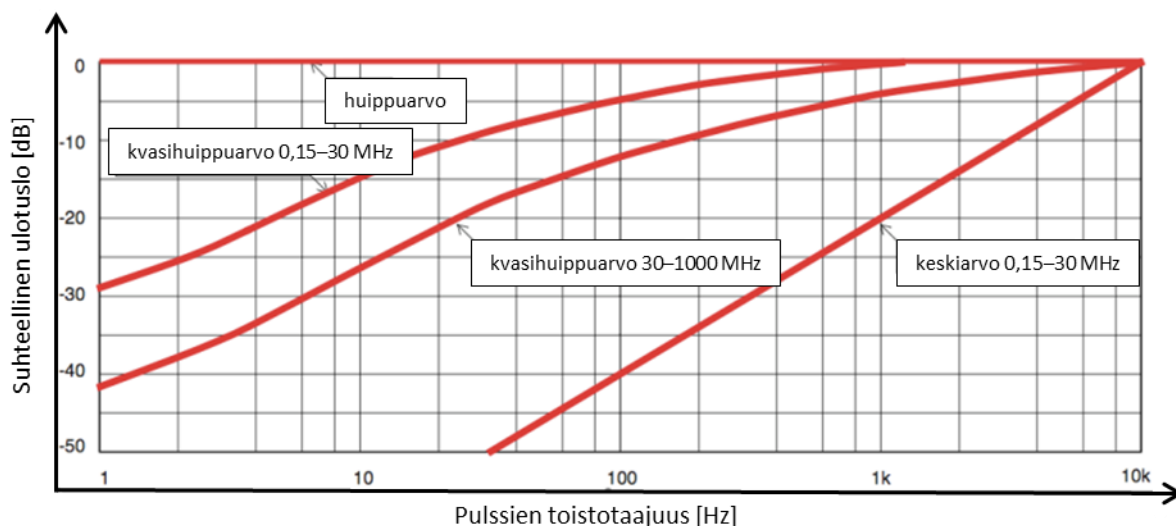
Välitaajuudelle sekoitettu signaali erotussuodatetaan, minkä jälkeen signaali skaalataan logaritmiselle tai lineaariselle asteikolle. Välitaajuussignaalia käsitellään ilmaisimella ja näin saatu matalataajuinen signaali ohjaa näytön pystypoikkeutusta. VCO:ta ohjaavan ramppigeneraattorin jännite viedään näytön vaakapoikkeutukselle. Tällä tavoin saadaan esitettyä signaalin amplitudi taajuuden funktiona. [23]



Kuva 4.1. Erään pyyhkäisevän spektrianalysaattorin lohkokkaavio. [23]

Spektrianalysaattori voi sisältää useita erilaisia ilmaisimia kuten keskiarvoilmaisim (average detector), huippuarvoilmaisim (peak detector) ja kvasihuippuarvoilmaisim (quasi-peak detector). Kuvassa 4.2 on esitetty eri ilmaisimien suhteelliset ulostulot pulssien toistotaajuuden funktiona. Yleensä sähköasemien ja voimajohtojen radiohäiriöiden mittaamiseen käytetyt RFI-mittalaitteet käyttävät kvasihuippuarvoilmaisinta, sillä se tuottaa mittatuloksen, joka kuvaa signaalin häiritsevyyttä radio- ja televisiolähetyksille korostamalla suuren toistotaajuuden signaaleita noin 10–30 dB:in verran verrattuna matalan toistotaajuuden signaaleihin. [5][26]

Toisin sanoen kvasihuippuarvoilmaisimet aliarvostavat osittaispurkausten kaltaisia matalan toistotaajuuden signaaleita. Paremmiin osittaispurkausten havaitsemiseen sopiikin huippuarvoilmaisim, sillä se antaa aina maksimisignaalin riippumatta pulssien toistotaajuudesta. Keskiarvoilmaisimella pystytään vuorostaan tunnistamaan kapeakaistaiset korkean toistotaajuuden tietoliikennesignaalit. [5][26]



Kuva 4.2. Huippu-, kvasihuippu- ja keskiarvoilmaisimien suhteelliset ulostulot pulssien toistotaajuuden funktiona. [5]

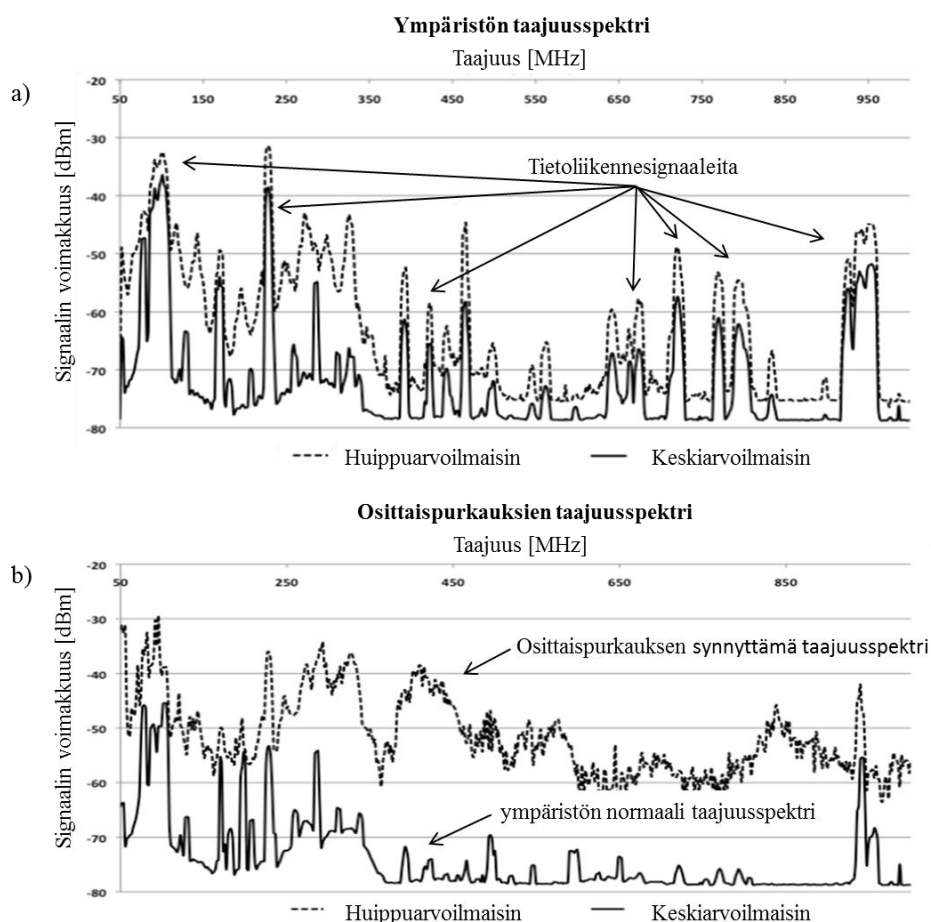
#### 4.2.2 Signaalien erottaminen toisistaan

Sähköasemilla tapahtuvissa RFI-mittauksissa esiintyy tyypillisesti kolmenlaisia signaaleita:

- laajakaistaista taustakohinaa,
- kapeakaistaisia korkean toistotaajuuden radio-, televisio- ja viestisignaaleita sekä
- laajakaistaisia matalan toistotaajuuden osittaispurkauksia.

Näiden signaalien erottaminen toisistaan on välttämätöntä, jotta RFI-menetelmällä pystytään tunnistamaan osittaispurkaukset ympäristön muista signaaleista. Tämä erottelu onnistuu mittaamalla taajuusspektrit samanaikaisesti sekä huippu- että keskiarvoilmaisimilla. Jos samaan aikaan mitatun signaalin keski- ja huippuarvo ovat likimain yhtä suuret, kyseessä on tehoa kuljettava korkean toistotaajuuden tietoliikennesignaali kuten kuvassa 4.3 a). Jos samaan aikaan mitatut huippu- ja keskiarvot poikkeavat selkeästi toisistaan kuten kuvassa 4.3 b), kyseessä on osittaispurkauksille tyypillinen matalan toistotaajuuden laajakaistainen signaali. [5]

Osittaispurkauksen aiheuttaman laajakaistaisen signaalin voi erottaa ympäristön laajakaistaisesta taustakohinasta myös hyödyntämällä vapaan tilan vaimennusta, sillä osittaispurkaussignaalit voimistuvat liikuttaessa purkauslähdettä kohti toisin kuin ympäristön taustakohina. RFI-mittauksissa pyritään siis havaitsemaan laajakaistaiset ympäristöstä poikkeavat signaalit, jotka voimistuvat lähestyttäessä epäiltyä purkauspaiikkaa. Mitattu signaali erotetaan ympäristön taustakohinasta ja tietoliikennesignaaleista käyttäen samanaikaisesti huippu- ja keskiarvomittauksia, jotka osittaispurkauksien tapauksessa eroavat erilaisen toistotaajuuden takia.



Kuva 4.3. Huippu- ja keskiarvoilmaisimella samanaikaisesti mitattuja taajuusspektrejä. a) Ympäristön taajuusspektri. Tietoliikennesignaalien huippu- ja keskiarvo eivät eroa merkittävästi toisistaan. b) Osittaispurkauksien taajuusspektri. Huippu- ja keskiarvo eroavat selkeästi toisistaan, koska osittaispurkaukset eivät siirrä tehoa.[5]

#### 4.2.3 Matalan toistotaajuuden signaalien mittaaminen

Kun mitataan matalan toistotaajuuden ilmiötä RFI-menetelmän avulla, haasteeksi tulee optimoida resoluutiokaistanleveys, taajuuskaista, pyyhkäisy aika, mittauksen kesto ja ilmaisimen valinta, jotta voidaan maksimoida todennäköisyys signaalin havaitsemiselle ja tarkalle amplitudin ja taajuuden mittaamiselle. Osittaispurkauksien aiheuttama sähkömagneettisen säteilyn taajuuskaista on leveämpi kuin mittalaitteen erosuodatuskaistanleveys. Tästä syystä pyyhkäisy spektrianalysoittorin täytyy kulkea säteilyn taajuuskaistan yli ja rakentaa spektri osista, jotka on mitattu eri hetkinä. [5]

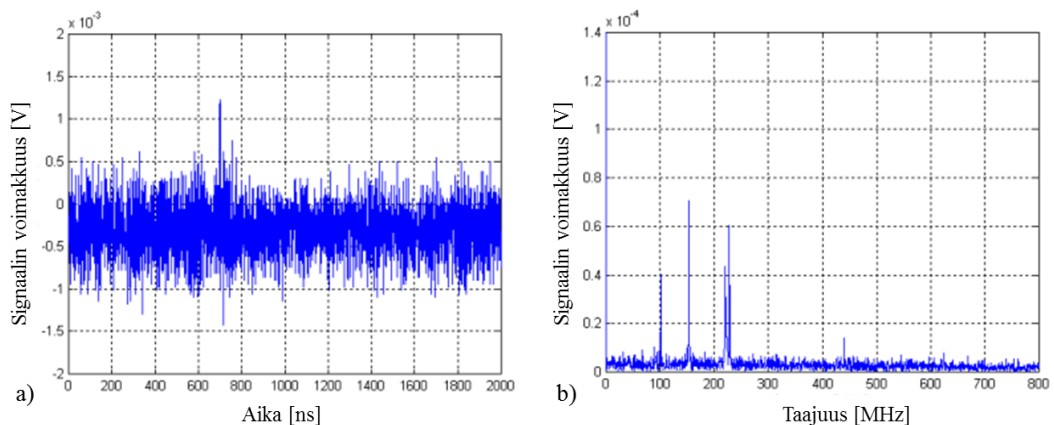
Eri hetkillä tapahtuvien mittausten takia ei voida olla varmoja, että osittaispurkauksen synnyttämä signaali esiintyy tietyllä taajuudella juuri pyyhkäisyhetkellä. Siksi mittausparametreilla on merkittävä vaikutus signaalin havaitsemiseen. Jos mittalaite viipyy tietyllä taajuudella riittävän kauan, signaali pystytään havaitsemaan. Todella epäsäännöllisten ja matalan toistotaajuuden osittaispurkauksien havaitsemisen todennäköisyyttä voidaan kasvattaa käyttämällä maksimipito-ominaisuutta (*max hold*) usealla pyyhkäisykerralla. Tällöin mittalaite pyyhkäisee taajuusalueen useamman kerran ja tallentaa muistiin aina suurimman arvon tietyllä taajuudella. [5]

### 4.3 Purkaustyyppin tunnistaminen taajuusspektrin perusteella

Osittaispurkausten synnyttämän purkauspulssin nousu- ja laskuaika vaikuttavat voimakkaasti säteilyn taajuusspektriin. Nousuajaltaan nopeammat purkauspulssit aiheuttavat loivemmin laskevan spektrin kuin hitaammat purkaukset. Purkauspulssin laskuajan suureneminen aiheuttaa spektrin jyrkemmän vaimenemisen. Purkauspulssin amplitudin kasvaminen nostaa kauttaaltaan spektrin tasoa, millä on vaikutusta suurimpaan taajuuteen, jolla signaali voidaan havaita. Spektrin muotoon amplitudin kasvulla ei kuitenkaan ole vaikutusta. Purkauspulssien toistotaajuuden muuttuminen ei myöskään vaikuta taajuusspektrin verhokäyrän muotoon. [2]

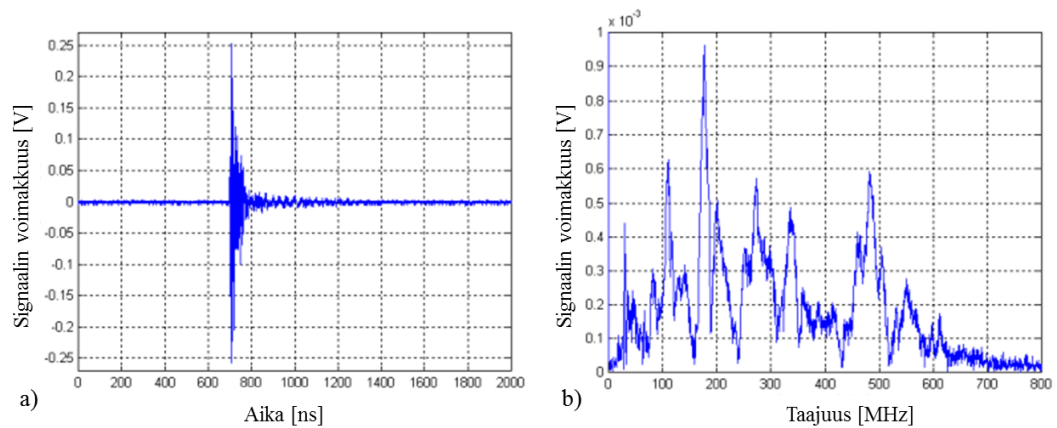
Erilaisilla osittaispurkauksilla on nousu- ja laskuajoista johtuen erilainen pulssimuoto ja taajuusspektri, joten RFI-menetelmän avulla voidaan periaatteessa osittaispurkauksen havaitsemisen lisäksi tunnistaa osittaispurkauksen tyyppi. Esimerkiksi huonoista kontakteista aiheutuvat kipinäpurkaukset ja ilmassa tapahtuvat koronapurkaukset voidaan erottaa öljyssä tapahtuvista osittaispurkauksista. [4, 27, 28] Alla on esitetty tutkimuksessa [27] havaittuja erilaisten keinotekkoisten osittaispurkauslähteiden synnyttämien signaaleita aika- ja taajuustasossa. Kuvista voidaan havaita eroja eri purkauslähteiden välillä.

Tarkastellaan ennen varsinaisia osittaispurkauksia mittauksissa aina esiintyvää taustakohinaa. Alla oleva kuva 4.4 esittää tyypillisen taustakohinan signaalin ja sen spektrin. Kuvasta havaitaan selvät taajuuspiikit 100, 150 ja 200 MHz:n taajuuksilla, jotka ovat tyypillisiä tietoliikenteen käyttämiä taajuuksia. Kohinan amplitudi on alle 2 mV, joka on huomattavasti pienempi kuin mitattujen osittaispurkausten voimakkuus. [27]



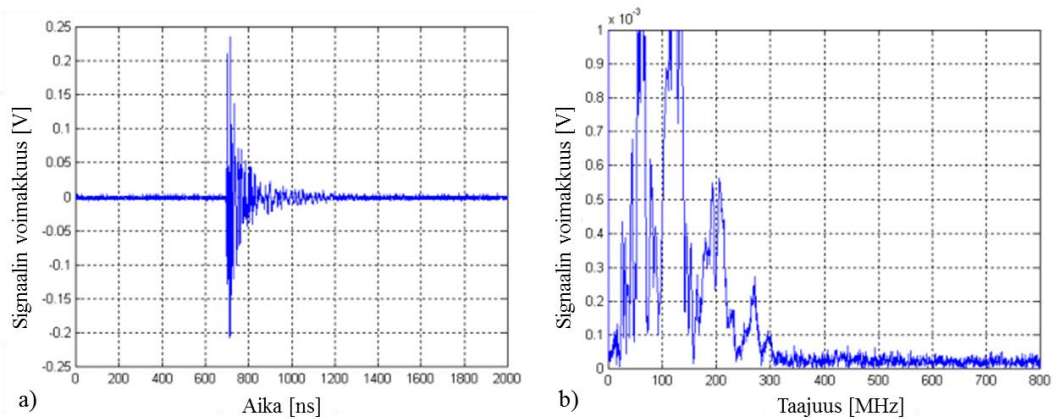
Kuva 4.4. Taustakohinan signaalinvoimakkuus a) ajan ja b) taajuuden funktiona. [27]

Seuraava kuva 4.5 esittää tyypillisen kelluvan potentiaalin synnyttämän purkaussignaalin. Purkauksen kesto on noin 100 ns ja purkauksen spektri ulottuu 600 MHz:n taajuuteen asti.



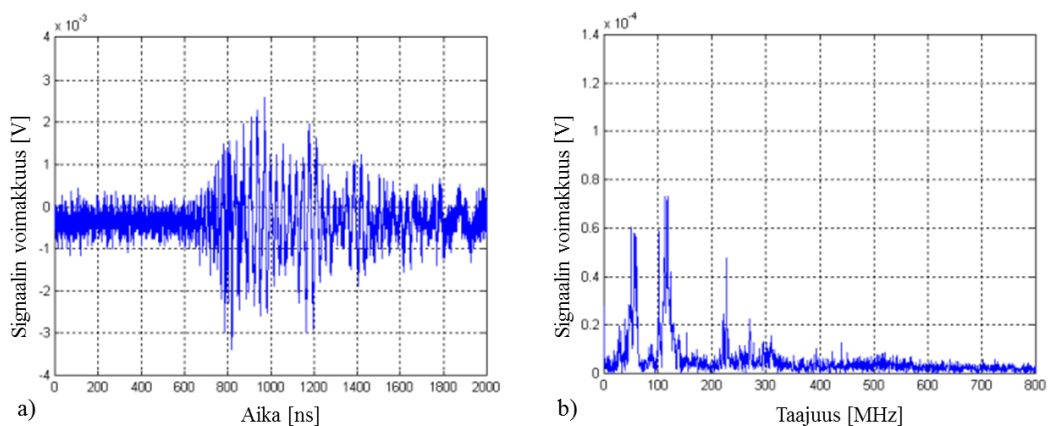
Kuva 4.5. Kelluvan potentiaalin synnyttämän purkauksen signaalinvoimakkuus a) ajan ja b) taajuuden funktiona. [27]

Kuva 4.6 esittää mineraaliöljyssä tapahtuvan osittaispurkauksen signaalin ja spektrin. Pulssin kesto on noin 200 ns ja signaali sisältämät taajuudet ovat alle 300 MHz, kun kelluvalla purkauksen spektri näkyi 600 MHz:in asti. [27]



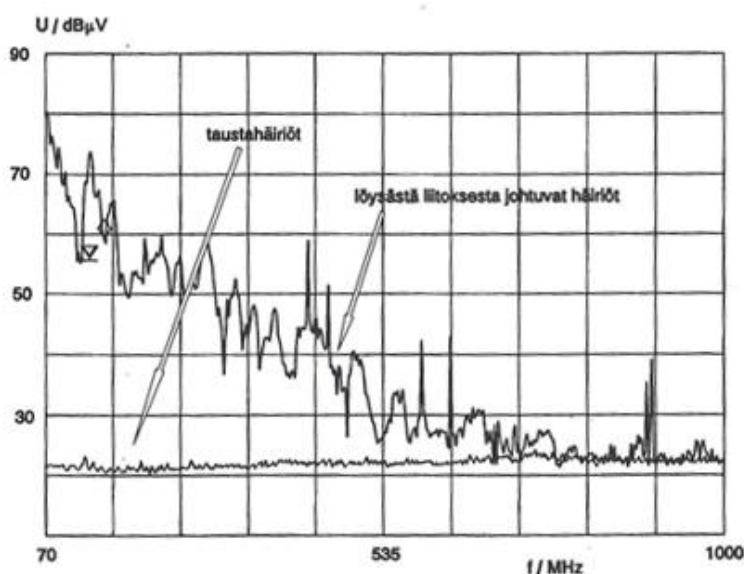
Kuva 4.6. Öljyssä tapahtuvan osittaispurkauksen signaalinvoimakkuus a) ajan ja b) taajuuden funktiona. [27]

Kuva 4.7 esittää ilmassa tapahtuvan purkauksen signaalin ja spektrin. Pulssin kesto on yli 800 ns ja se sisältää alle 150 MHz:n taajuuksia. Lisäksi signaalin voimakkuus on heikko, joten purkaus ei peitä alleen muita taajuusspektrejä. [27]



Kuva 4.7. Ilmassa tapahtuvan purkauksen signaalinvoimakkuus a) ajan ja b) taajuuden funktiona. [27]

Kuva 4.8 esittää löysän liitoksen synnyttämän taajuusspektrin. Löysän liitoksen synnyttämä spektri yltää noin 800 MHz:n taajuudelle. Löysät liitokset ovat melko yleisiä sähköasemilla, joten kyseisen spektrimuodon tunnistaminen on tärkeää. [2]



*Kuva 4.8. Löysän liitoksen synnyttämä taajuusspektri verrattuna taushäiriön taajuusspektriin. [2]*

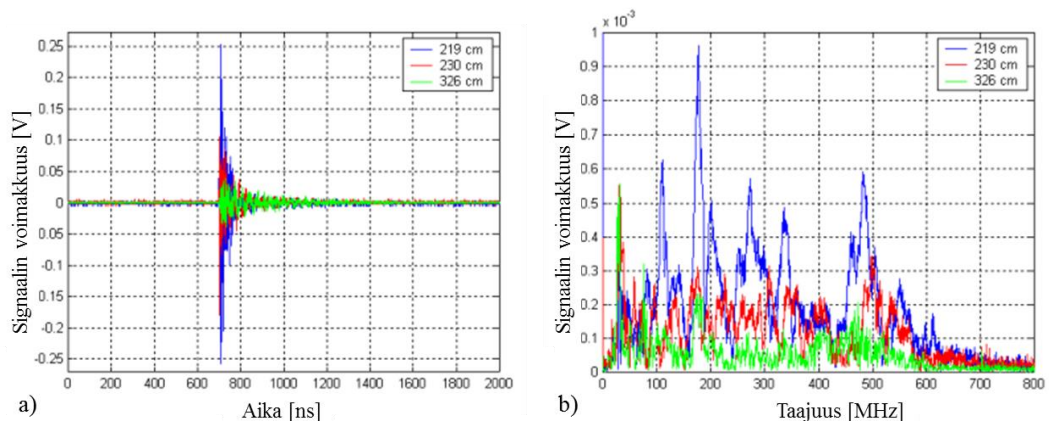
Kuvissa 4.5–4.8 esitetyt taajuusspektrit ovat vain osatotuus eri osittaispurkaustyyppien spektrimuodoista. Erilaisilla laitteistoilla ja asetuksilla on vaikutusta siihen, kuinka herkkiä signaaleita ja millaisia spektrikuviota saadaan mitattua. Yhtenevien ja toistettavien mittaustulosten saavuttamista varten tarvitaan standardisointia, jota ei vielä ole RFI-mittauksilla. [28] Asiaan on kuitenkin tulossa muutos, sillä vuonna 2015 julkaistaan standardiehdotus IEC 62748 [29], joka käsittelee osittaispurkausten mittaamista sähkömagneettisilla ja akustisilla menetelmillä.

Rajan ja Floribertin tutkimuksessa [28] todetaan, että osa osittaispurkausvioista voidaan tunnistaa taajuusspektrin avulla jo aikaisessa vaiheessa, mutta toisaalta osa vioista pystytään tunnistamaan vasta myöhemmässä vaiheessa vikaprosessia. Tämä johtuu siitä, että osittaispurkauksen synnyttämä taajuusspektri voi muuttua vian kehittyessä. Purkaustyyppin tunnistaminen onnistuu parhaiten, kun vika on ehtinyt kehittyä tilanteeseen, jossa purkaukset ja niiden aiheuttamat taajuusspektrit ovat stabiileja. Alkuvaiheessa olevia osittaispurkauksia ei pystytä välttämättä edes havaitsemaan RFI-menetelmän avulla, koska niiden synnyttämät signaalit ovat liian heikkoja havaittaviksi.



#### 4.4 Purkauksen paikantaminen

Kuten luvussa 3.3 todettiin, osittaispurkauksen synnyttämä vapaassa tilassa etenevä sähkömagneettinen säteily vaimenee etäisyyden ja taajuuden funktiona. Kuva 4.9 esittää antennin ja osittaispurkauslähteen etäisyyden vaikutuksen signaalin muotoon ja spektriin. Mittauksen amplitudi vaimenee etäisyyden funktiona, mutta spektrissä esiintyvät silti samat hallitsevat taajuuskomponentit. Liikkumalla voimistuvan signaalin suuntaan pystytään periaatteessa paikantamaan komponentti tai alue, jossa osittaispurkaukset syntyvät. [27]



Kuva 4.9. Osittaispurkauksen signaalinvoimakkuus a) aika- ja b) taajuustasossa, kun mittaukset on tehty kolmella eri etäisyydellä purkauspaiasta. [27]

Jos mittausalueella on lähekkäin useampia osittaispurkauslähteitä, niiden paikantaminen yhdellä ympärisäteilevällä antennilla pelkän vaimennuksen perusteella voi osoittautua hankalaksi tai jopa mahdottomaksi. Tällöin voidaan käyttää muita tarkempia paikannusmenetelmiä kuten suuntaavia antennia tai suurtaajuista virtamuuntajaa (HFCT, *high frequency current transformer*). Suuntaavalla antennilla on kapea keilanleveys, joten sillä pystytään päättelemään voimakkaimman säteilyn suunta. HFCT-mittapäätä käytetään puolestaan sähköasemakomponentin maadoitusjohtimen tai kaapelin ympärillä, jolloin pystytään havaitsemaan, onko mittapään sisään jäävässä johtimessa laajakaistaisia purkauspulsseja. HFCT-mittapään käyttäminen voi olla ongelmallista tilanteissa, jossa useampi laite on maadoitettu saman johtimen kautta. Vaikka HFCT-mittapäällä ja suuntaavilla antennilla voidaan paikantaa purkaukset tarkemmin, niiden käyttäminen on hitaampaa kuin ympärisäteilevän antennin. Siksi ne sopivatkin parhaiten karkeiden havaintojen tarkempaan paikantamiseen.

Purkauslähteiden paikantaminen on mahdollista myös usean antennin järjestelmillä, jotka seuraavat itsenäisesti radiotaajuuksilla esiintyviä normaalista taustakohinasta poikkeavia transientteja. Purkaussignaalin suunta ja etäisyys voidaan laskea esimerkiksi lentoaika-algoritmeilla (*time-of-flight*), joka perustuu eri antenneihin saapuvien signaalien aikaerojen hyödyntämiseen. Laajojen testijärjestelmien avulla on saatu kattava mittausaineisto ja signaalien prosessointitekniikoita on pystytty kehittämään niin luotettavalle tasolle, että useita pysyviä järjestelmiä on asennettu muun muassa Isoon-Britanniaan, Yhdysvaltoihin ja Australiaan, missä ne ovat jatkuvassa käytössä. [6, 24]

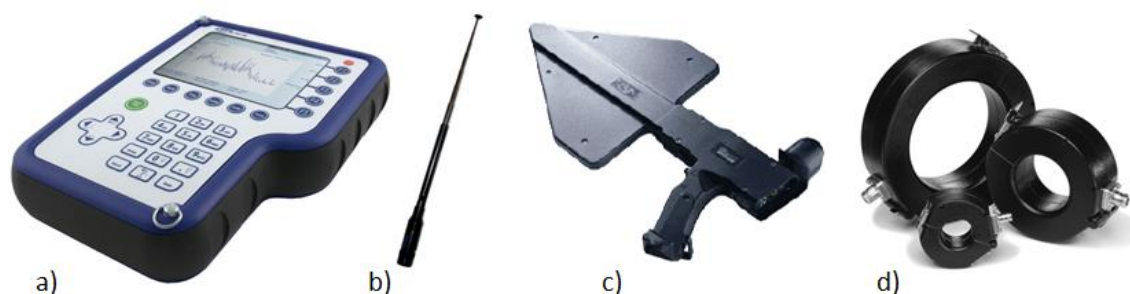


## 5 PDS100-mittalaite

*Tässä luvussa esitellään PDS100-mittalaite, jota käytetään tämän diplomityön mittauksissa suurjännitelaboratoriossa ja sähköasemilla. Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan kyseisen mittalaitteen soveltuvuutta sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan.*

PDS100-mittalaitteen on kehittänyt suurjännitetestaukseen ja diagnostiikkaan erikoistunut Doble Engineering -yhtiö yhteistyössä skotlantilaisen Glasgow Caledonian -yliopiston kanssa. PDS100-mittalaite on tarkoitettu sähköasematarkastuksiin, joissa asema-alue kuljetaan läpi ja samanaikaisesti mittaamalla varmistetaan, ettei suurjännitelaitteista löydy haitallisia osittaispurkauksia.

Kuvassa 5.1 esitetyn PDS100 mittalaitteen ulkoiset mitat ovat 225 x 310 x 70 mm ja se painaa 2,4 kg, joten se on helposti käsin liikuteltavissa mittaushetkellä. Laite on suojattu pölyä ja kosteutta vastaan IP64/51-luokan mukaisesti, ja valmistajan ilmoittama toimintalämpötila on -10 ... +50 °C eli laite sopii hyvin ulko-olosuhteisiin. Laitetta on käytetty kylmemmissäkin olosuhteissa ongelmitta. Mittalaite toimii sisäisellä 6,6 Ah:n litiumioniakulla, joka on ladattavissa verkkovirralla. PDS100:ssa käytetään normaalisti ympärisäteilevää antennia, mutta laitteeseen on mahdollista kiinnittää myös suuntaava antenni, maadoitusjohtimien ympärille asetettava HFCT-mittapäätä tai laitteen metalliseen kuoreen indusoituvien jännitteiden mittaamiseen tarkoitettu TEV-anturi (*transient earth voltage*). Kuvassa 5.1 on esitetty tässä tutkimuksessa käytetyt mittapäät. [30]



*Kuva 5.1. a) Doble PDS100 -mittalaite, b) ympärisäteilevä antenni W-889, c) Rohde & Schwartz suuntaavaa antenni HE200, d) ETS Lindgren 93686-8 HFCT-mittapäitä.*

Mittalaite käyttää taajuustason mittauksiin pyyhkäisevää spektrianalysointia, joiden yleinen toimintatapa on esitelty tarkemmin luvussa 4.2.1. PDS100 ei siis tee mitatulle signaalille Fourier-muunnosta, vaan se rakentaa taajuusspektrin pyyhkäisemällä taajuuskaistan läpi pienissä osissa. Mittausalue on 50–1000 MHz, mittausta-alueleveydeksi voidaan valita joko 1 tai 6 MHz ja viipymisaika tietyllä taajuusalueella voidaan valita väliltä 1–100 millisekuntia. Mittalaitteen tarkkuus on  $\pm 100$  kHz. [30]

Mittalaitteessa voidaan käyttää huippuarvo- tai keskiarvoilmaisinta. Huippuarvoilmaisinta käytetään osittaispurkauksen havaitsemiseen. Keskiarvo-pyyhkäisy-erityinen etu on se, että sillä voidaan erotella tietoliikenteen signaalit purkaussignaaleista. Pyyhkäisy-erityiseksi voidaan valita jatkuva-, keskiarvo-, maksimipito-

tai erotuspyyhkäisy. [30] Tässä tutkimuksessa on käytetty pääasiassa jatkuvaa pyyhkäisyä sekä maksimipitopyyhkäisyä, joka pyyhkäisee taajuusalueen monta kertaa ja tallentaa muistiin aina suurimman arvon.

Sähkömagneettisen säteilyn mittaukset ovat suhteellisia ja osoittavat vain energian olemassaolon toisin kuin perinteiset galvaaniset osittaispurkausmittaukset, jotka ilmaisevat näennäisvarauksen suuruuden pikocoulombeina. Antenni mittaa tehoa, joka esitetään käyttäjälle dBm-asteikolla. Tietokoneelle viedyt mittaukset voidaan esittää myös häiriöjännitteenä lineaarisella (mV,  $\mu$ V) tai logaritmisella asteikolla (dBmV, dB $\mu$ V). [30]

Mittalaitteella on mahdollista mitata aikatasossa joko tietyn taajuista signaalia sähköverkon 20 millisekunnin jakson aikana tai signaalin voimakkuutta pidemmällä ajanjaksolla. [30] Ensimmäiseksi mainitulla tavalla pystytään havaitsemaan osittaispurkauksille tyypillisiä pulsseja tai pulssisarjoja. Mittalaitetta ei pystytä kuitenkaan tahdistamaan verkkojännitteeseen, joten laitteella ei pysty tarkastelemaan purkauspulssien sijoittumista verkkojännitteen jaksoon nähden. Tietyn taajuisen signaalin mittaamista pidemmällä ajanjaksolla voidaan käyttää osittaispurkauksen paikantamiseen liikkumalla voimistuvan signaalin suuntaan. Aikatazon mittauksissa käytettävä taajuus valitaan spektristä sellaisesta kohdasta, jossa osittaispurkauksen ja taustakohinan välinen ero on mahdollisimman suuri.

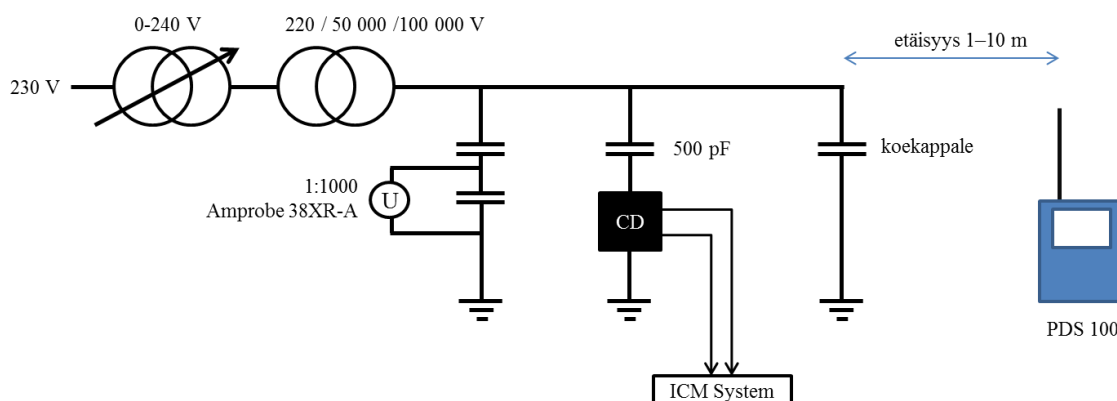
## 6 Mittaukset suurjännitelaboratoriossa

Tässä diplomityössä suoritin osittaispurkausmittauksia erilaisissa testikappaleissa Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun suurjännitelaboratoriossa. Mittausten tavoitteena oli selvittää, tukevatko PDS100-mittalaitteella tehdyt laboratoriomittaukset kirjallisuudesta ja sähköasemilta saatuja mittaustuloksia ja -kokemuksia. Lisäksi mittausten tavoitteena oli varmistaa, pystytäänkö osittaispurkausten esiintyminen havaitsemaan RFI-menetelmän avulla luotettavasti. Seuraavissa alaluvuissa esitetään käytetty mittausrjestely, testikappaleet sekä mittaustulokset.

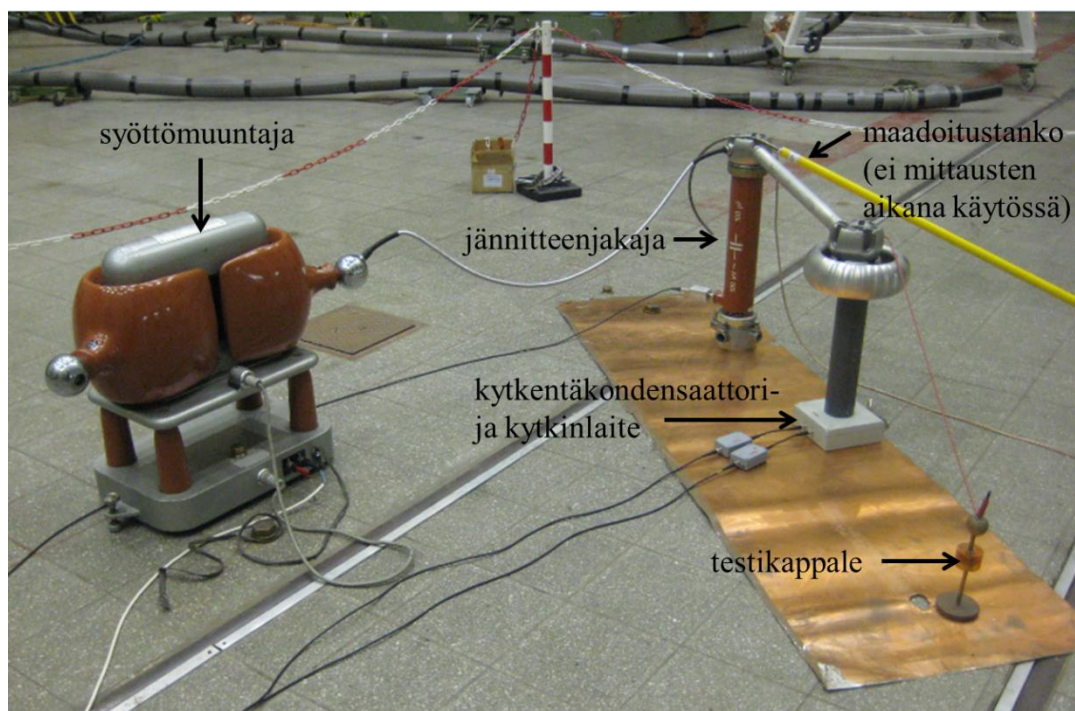
### 6.1 Mittausjärjestelyt

Mittaukset suoritettiin kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa siten, että tiedettiin milloin osittaispurkauksia syntyy testikappaleessa. Mittauksissa käytettiin kuvissa 6.1 ja 6.2 esitettyjä mittausrjestelyjä. Osittaispurkaukset tuotettiin testikappaleeseen nostamalla vaihtojännitettä säätömuuntajan avulla ensin syttymisjännitteeseen asti ja siitä vielä ylöspäin kunnes saatiin voimakkaampia osittaispurkauksia. Jännite mitattiin kapasitiivisen jännitteenjakajan (jakosuhde 1:1000) avulla Amprobe 38XR-A-mittarilla. Osittaispurkausten olemassaolo todennettiin galvaanisella mittauksella käyttäen ICM System -mittausjärjestelmää, jolla saadaan mitattua muun muassa purkausten näennäisvaraus ja jakautuminen vaiheen funktiona. PDS100-mittalaite oli sijoitettu liikutettavalle tasolle 1–10 metrin etäisyydelle mittausrkohteesta.

Jokaisen testitapauksen mittaukset toistettiin 2–5 kertaa siten, että jännite nostettiin ylös osittaispurkauksia synnyttävälle tasolle. Toistojen välissä laskettiin jännite noltaan volttiin. Jokaisesta mittaustoistosta tallennettiin PDS100:n mittaama taajuusspektri sekä hallitsevilta taajuusalueilta aikatazon signaalit. Mittauksista kirjattiin ylös vallitseva koejännite, näennäisvarauksen suuruus sekä mittausrkettä testikappaleeseen.



Kuva 6.1. Käytetty mittausrkytkentä. Säätömuuntajan ja syöttömuuntajan avulla tuotiin vaihtojännite mittausrpiiriin. Jännite mitattiin jännitteenjakajan (1:1000) avulla Amprobe 38XR-A-mittarilla. Osittaispurkaukset mitattiin galvaanisesti kytkinlaitteen (CD, coupling device) ulostuloista ICM Systemsin avulla. PDS100-mittalaite oli 1–10 metrin etäisyydellä purkausrkettä.



Kuva 6.2. Mittausjärjestely. ICM System ja PDS 100 mittalaitteet sijaitsevat kuvan ulkopuolella.

## 6.2 Testikappaleet

### Hartsikappale

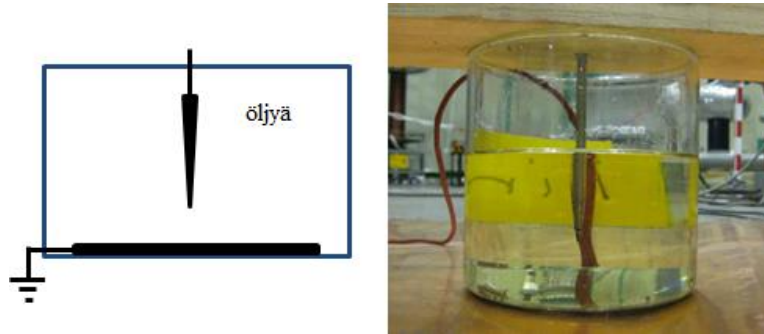
Kiinteässä eristeessä tapahtuvat ontelopurkaukset toteutettiin kuvan 6.3 hartsikappaleella, jonka sisälle on valmistusvaiheessa jäänyt ilmakuplia. Osittaispurkaukset syttyivät keskimäärin 3,8 kV:n jännitteellä. Osittaispurkauksia mitattiin keskimäärin 5,1 kV:n jännitteellä. Purkausten näennäisvaraus oli keskimäärin 2,7 nC. PDS100-mittaukset toteutettiin viiden metrin etäisyydellä testikappaleesta.



Kuva 6.3. Hartsikappaleessa tapahtuvien ontelopurkauksien testikappale.

### Öljyssä tapahtuva korona

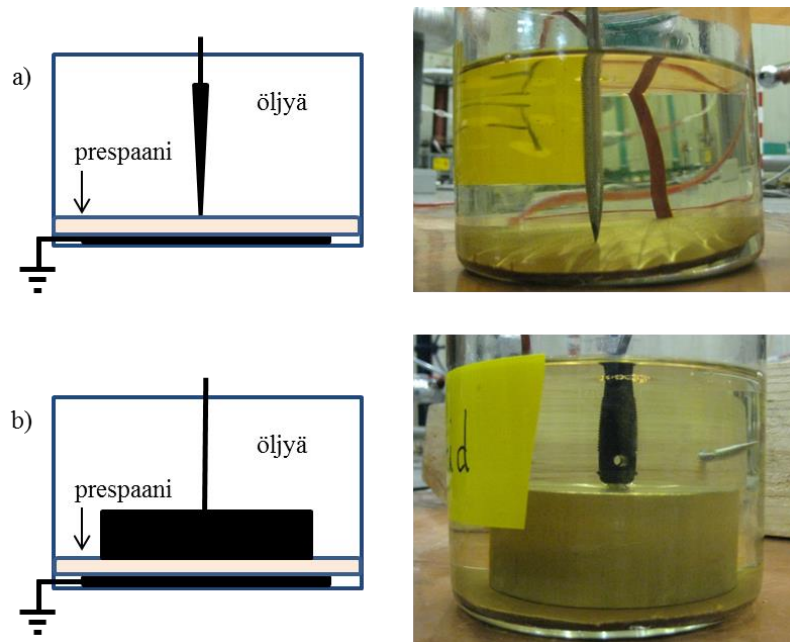
Öljyssä tapahtuvaa korona toteutettiin öljyastian sijoitetulla kärki-taso-kipinävälillä, joka on esitetty kuvassa 6.4. Terävän kärjen etäisyys maadoitettuun tasoelektrodiin oli 2,6 cm. Purkaukset syttyivät keskimäärin 13,5 kV:n jännitteellä. Osittaispurkauksia mitattiin keskimäärin 16,5 kV:n jännitteellä. Purkausten näennäisvaraus oli keskimäärin 200–400 pC. PDS100-mittaukset toteutettiin viiden metrin etäisyydellä testikappaleesta.



*Kuva 6.4. Öljyssä tapahtuvan koronan testikappale.*

### Prespaanissa tapahtuvat osittaispurkaukset

Prespaanissa tapahtuvat osittaispurkaukset toteutettiin asettamalla öljyastian kahden elektrodin väliin öljyssä kyllästetty prespaanilevy, joka toimi eristeenä. Suurjännitteisenä elektrodina käytettiin sekä teräväkärkistä elektrodia että tasoelektrodia. Käytetyt testikappaleet on esitetty kuvassa 6.5. Purkaukset syttyivät keskimäärin 15,0 kV:n jännitteellä. Osittaispurkauksia mitattiin keskimäärin 19,1 kV:n jännitteellä. Näennäisvarauksen suuruutta ei tunneta, koska sähköinen mittaus oli kytketty irti mittauslaitteiston suojelemiseksi. PDS100-mittaukset tallennettiin kolmen metrin etäisyydellä testikappaleesta.



*Kuva 6.5. Prespaanissa tapahtuvien osittaispurkauksien testikappaleet. a) Kärki-tasoelektrodipari, b) taso-tasoelektrodipari.*

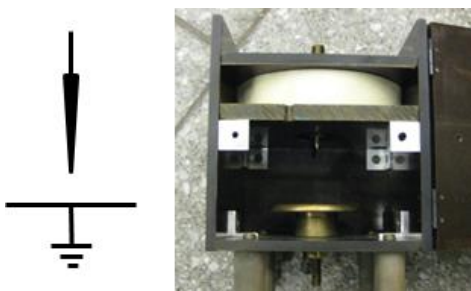


### Kelluva potentiaali

Kelluvan potentiaalin aiheuttamat osittaispurkaukset toteutettiin käyttämällä samoja testikappaleita kuin kuvassa 6.5, mutta vastaelektrodi jätettiin maadoittamatta. Kärki-taso-elektrodiparilla osittaispurkauksien näennäisvaraus oli keskimäärin 300 pC ja mittausten aikainen jännite oli keskimäärin 18 kV. Taso-taso-elektrodiparilla osittaispurkauksien näennäisvaraus oli keskimäärin 4,2 nC ja mittausten aikainen jännite oli keskimäärin 9,0 kV. PDS100-mittaukset tallennettiin kolmen metrin etäisyydellä.

### Korona

Koronapurkaukset toteutettiin ilmassa olevalla 4 cm:n kipinävälillä, joka on esitetty kuvassa 6.6. Korona syttyi keskimäärin 9,8 kV:n jännitteellä ja osittaispurkauksia mitattiin 10,7 kV:n jännitteellä. Sähköisellä mittauksella varmistettiin, että koronapurkaukset esiintyivät positiivisen ja negatiivisen jännitteen huippujen kohdalla. Koronan näennäisvaraukseksi mitattiin keskimäärin 800 pC. PDS100-mittaukset tallennettiin viiden metrin etäisyydellä testikappaleesta



*Kuva 6.6. Koronapurkauksien toteuttamiseen käytetty kärki-taso-elektrodipari.*

### Kosketushäiriö

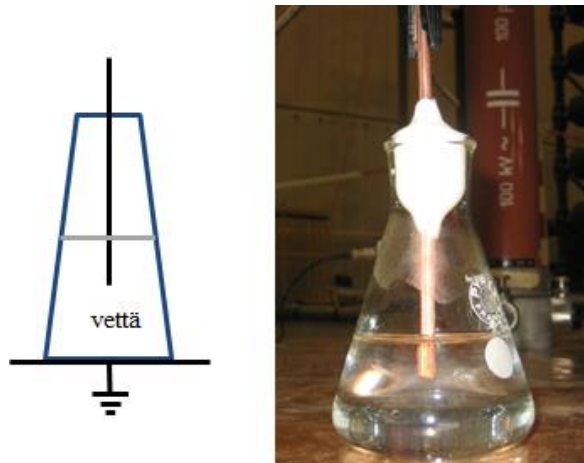
Kosketushäiriön synnyttämät osittaispurkaukset toteutettiin kondensaattorin lähelle tuodulla johtimella, joka ei ollut kytkettynä kondensaattoriin, vaan kierretty kruunun ympärille. Tilanne on esitetty kuvassa 6.7. Osittaispurkaukset syttyivät keskimäärin 2,4 kV:n jännitteellä ja purkauksia mitattiin keskimäärin 2,8 kV:n jännitteellä. Syntyneiden purkausten näennäisvaraus oli keskimäärin 3,1 nC. PDS100-mittaukset tallennettiin viiden metrin etäisyydellä testikappaleesta



*Kuva 6.7. Kosketushäiriön toteuttaminen kondensaattorin lähelle tuodulla johtimella.*

### Pintapurkaukset

Pintapurkaukset toteutettiin kuvan 6.8 Leydenin pullolla käyttäen 17,1 kV:n jännitettä. Näennäisvarauksen suuruutta ei tunneta, koska sähköinen mittausta oli kytketty irti mittaustalteen suojelemiseksi. PDS100-mittaukset tallennettiin kahden metrin etäisyydellä testikappaleesta



*Kuva 6.8. Leydenin pullolla toteutetut pintapurkaukset lasipinnalla.*

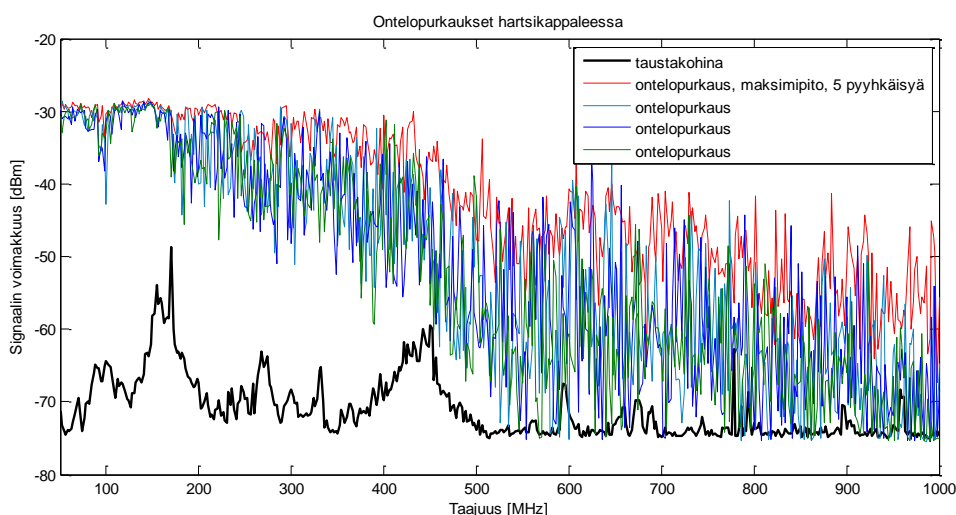
### **6.3 Mittaustulokset**

Tässä luvussa esitetään laboratoriossa mitatut osittaispurkauksien taajuusspektrit verrattuna laboratorion taustakohinaan. Koska osittaispurkaukset ovat satunnainen tilastollinen ilmiö, taajuusspektreissä on esitetty usean mittaustoiston tulokset. Näin saadaan parempi käsitys, millainen spektrimuoto kullakin osittaispurkaustyyppillä on. Mittaustuloksissa tärkeää on spektrin muoto suhteessa taustakohinan spektriin, eli millä taajuusalueilla mitattu tehosuhte poikkeaa eniten taustasosta ja mitkä ovat spektrin hallitsevia taajuuksia. Mittausten perusteella eri osittaispurkaustyyppit esiintyivät pääosin seuraavilla taajuusalueilla:

- ontelopurkaukset 0–1000 MHz,
- kosketushäiriö 0–1000 MHz,
- osittaispurkaukset prespaanissa 0–500 ja 700–800 MHz,
- kelluva potentiaali öljyssä 0–500 MHz,
- korona 0–200 MHz,
- korona öljyssä 0–200 MHz,
- pintapurkaukset 0–150 MHz ja 300–600 MHz.

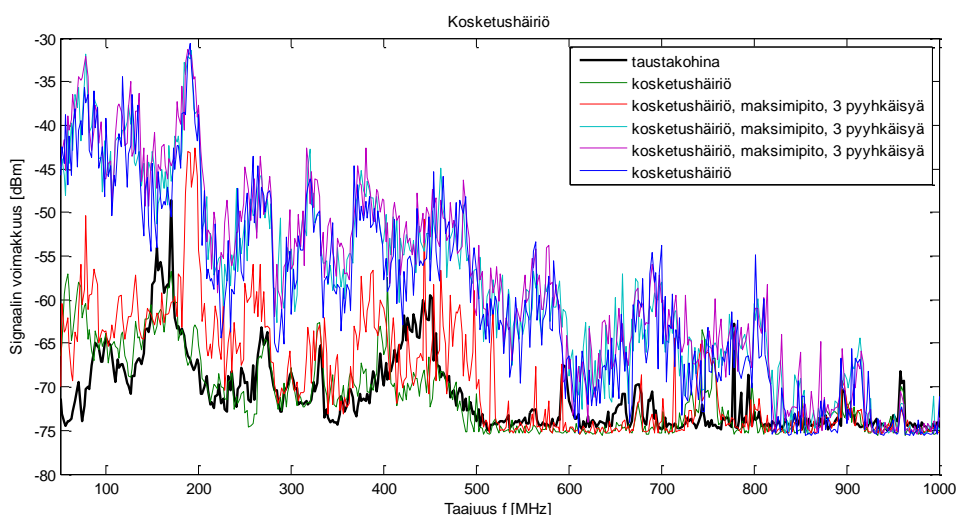
PDS100:lla tallennetut aikatazon mittaukset on esitetty liitteessä A. Aikatazon mittausten perusteella pystyttiin ainoastaan toteamaan, että PDS100-mittalaite havaitsi tietyllä taajuudella osittaispurkauksille tyypillisiä teräviä pulsseja tai pulssisarjoja. Vaikka PDS100 mittaa pulssit 20 ms:n aikana, niin pulssien sijaintia ei voida paikantaa suhteessa koejännitteen jaksoon. Eri purkaustyyppien aikatazon mittaukset eivät myöskään poikenneet toisistaan. Tästä syystä pulssien sijainnista tai keskinäisestä suhteesta ei pysty päättämään esimerkiksi purkauksen tyyppiä.

Kuvassa 6.9. on esitetty hartsikappaleessa tapahtuvien ontelopurkausten synnyttämä taajuusspektri. Kuten kuvasta nähdään, ontelopurkaukset synnyttävät koko 0–1000 MHz:n taajuuskaistan levyisen signaalin. Signaalin voimakkuus vaihtelee voimakkaasti varsinkin yli 500 MHz:n taajuuksilla. Epävakaan signaalin vuoksi mittauksissa tallennettiin viidestä pyyhkäisystä koostuva punainen verhoikäyrä käyttämällä maksipitoa.



Kuva 6.9. Hartsikappaleessa tapahtuvien ontelopurkauksien taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.3 testikappaletta.

Kuvassa 6.10 on esitetty kosketushäiriön synnyttämä taajuusspektri. Kuten kuvasta nähdään, myös kosketushäiriö synnyttää koko 0–1000 MHz:n taajuuskaistan levyisen signaalin. Kosketushäiriön synnyttämä taajuusspektri on vakaa, sillä signaalin voimakkuus ei vaihtele yhtä paljon kuin esimerkiksi kuvan 6.9 ontelopurkauksilla.

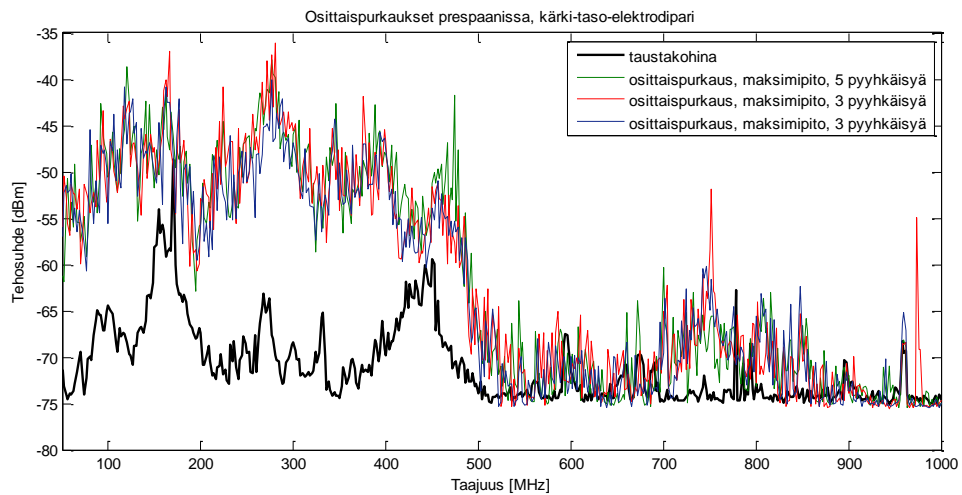


Kuva 6.10. Kosketushäiriöiden synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.7 testikappaletta.

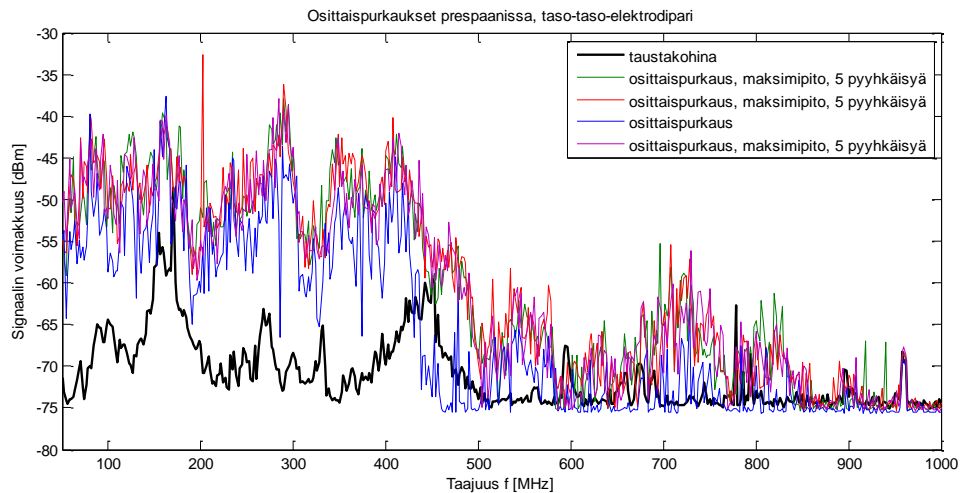


Kuvissa 6.11 ja 6.12 on esitetty prespaanissa tapahtuvien osittaispurkauksien taajuusspektrit. Mittaukset tehtiin kuvan 6.5 a) kärki-taso ja kuvan 6.5 b) taso-taso elektrodipareilla. Molemmissa tapauksissa osittaispurkaukset synnyttivät signaalin, jonka dominoivat taajuuskomponentit jäivät alle 500 MHz:n.

Lisäksi molemmissa kuvissa nähdään 750 MHz:n ympäristössä toinen taajuusalue, jossa signaalin voimakkuus poikkesi selkeästi taustakohinasta. Poikkeama ei välttämättä johdu prespaanissa tapahtuvista osittaispurkauksista, sillä taajuudella 750 MHz tehdyssä aikatason mittauksessa esiintyi pulsseja koko 20 millisekunnin jakson aikana, mikä on epätyypillistä osittaispurkauksille.



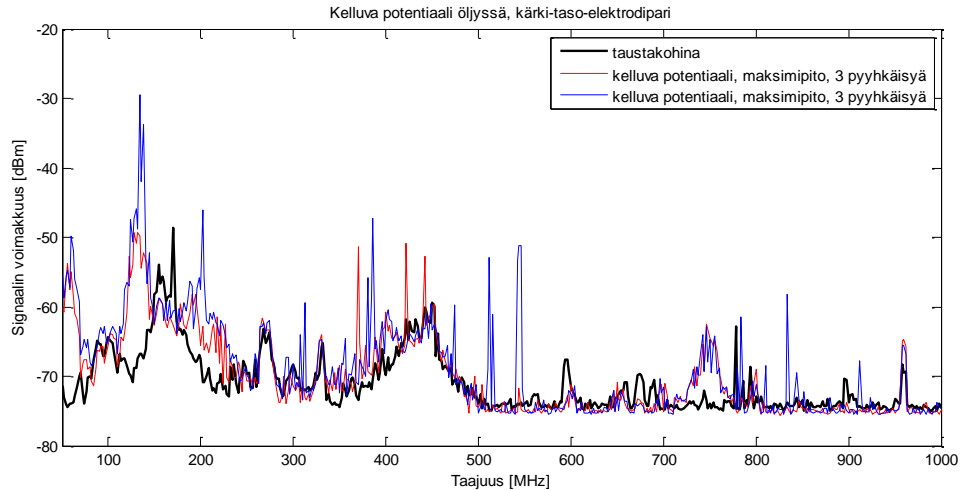
Kuva 6.11. Prespaanissa tapahtuvien osittaispurkauksien taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.5 a) testikappaletta.



Kuva 6.12. Prespaanissa tapahtuvien osittaispurkauksien taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.5 b) testikappaletta.

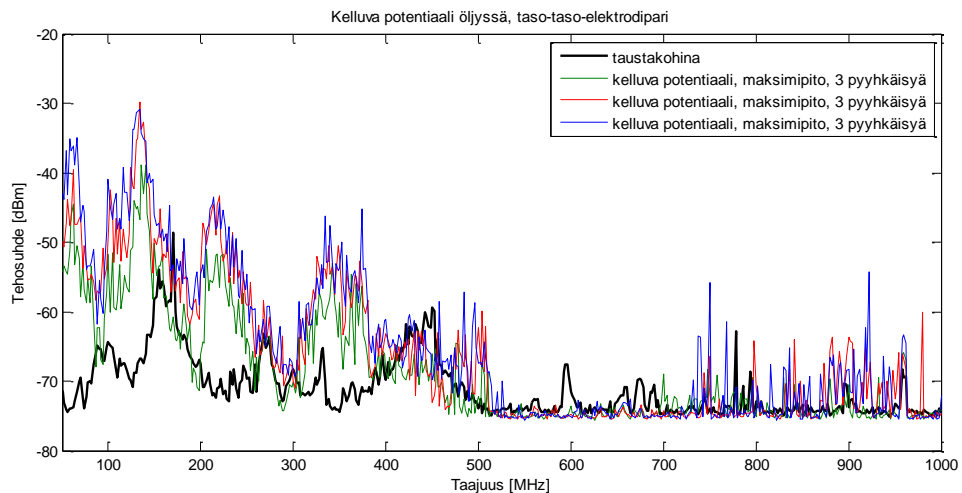
Kuvissa 6.13 ja 6.14 on esitetty kelluvien potentiaalien synnyttämät taajuusspektrit. Mittaukset tehtiin kuvan 6.5 a) kärki-taso ja kuvan 6.5 b) taso-taso elektrodipareilla, joiden vastaelektrodit olivat jätetty maadoittamatta.

Kuvan 6.13 kärki-taso-elektrodiparin tapauksessa saatiin mitattua vain hyvin heikko signaali, joka rajoittui alle 250 MHz:n taajuudelle. Lisäksi 750 MHz:n taajuudella esiintyi samantyyppinen poikkeama kuin kuvien 6.11 ja 6.12 mittauksissa.



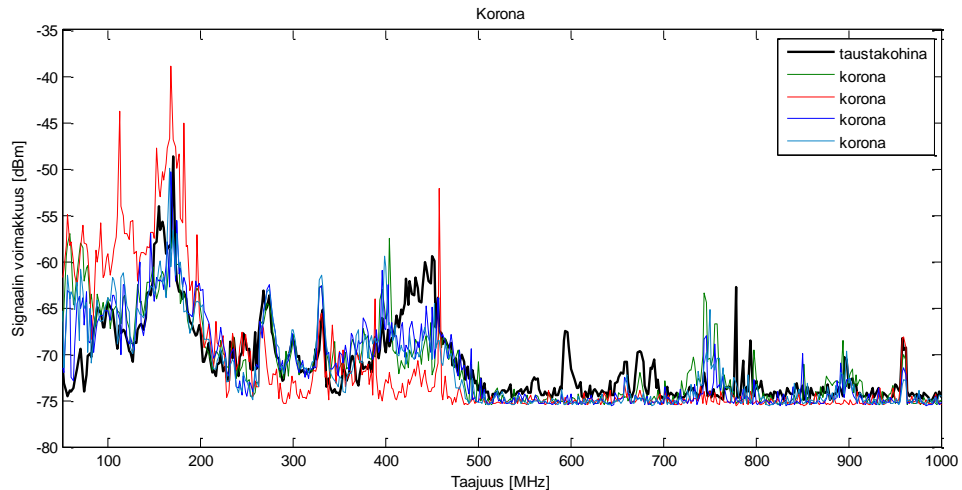
*Kuva 6.13. Kelluvan potentiaalin synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.5 a) testikappaletta maadoittamattomalla vastaelektrodilla.*

Kuvan 6.14 taso-taso-elektrodiparin tapauksessa saatiin mitattua voimakkaampi ja selkeämpi taajuusspektri, joka rajoittui alle 500 MHz:n taajuudelle. Taajuusalueella 700–1000 MHz on lisäksi pieniä poikkeamia taustakohinasta. Kelluvan potentiaalin taajuusspektrin muoto muistuttaa kuvan 6.10 kosketushäiriön synnyttämää signaalia, mutta yli 500 MHz:n komponentit ovat vaimeampia kelluvan potentiaalin tapauksessa.



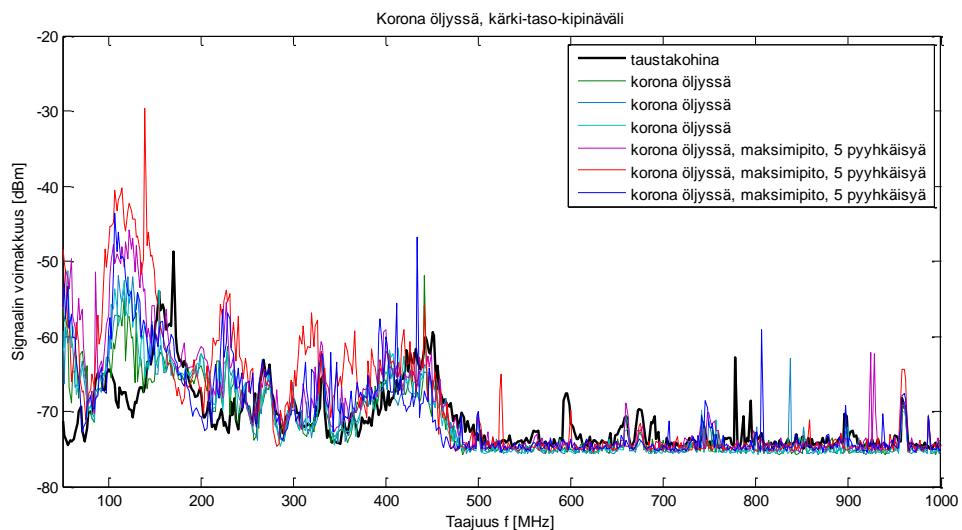
*Kuva 6.14. Kelluvan potentiaalin synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.5 b) testikappaletta maadoittamattomalla vastaelektrodilla.*

Kuvassa 6.15 on esitetty koronan synnyttämä taajuusspektri. Mittauksen perusteella voidaan todeta, että korona ilmenee alle 200 MHz:n taajuusalueella, mikä tukee myös muun muassa luvussa 4.5 esitettyjä havaintoja. Tämä on tärkeä havainto, koska sähköasemilla ja voimajohdoilla esiintyy vääjäämättä koronaa. Koska koronan taajuusspektri rajoittuu alle 200 MHz:n, se ei peitä alleen muita osittaispurkaustyyppisiä.



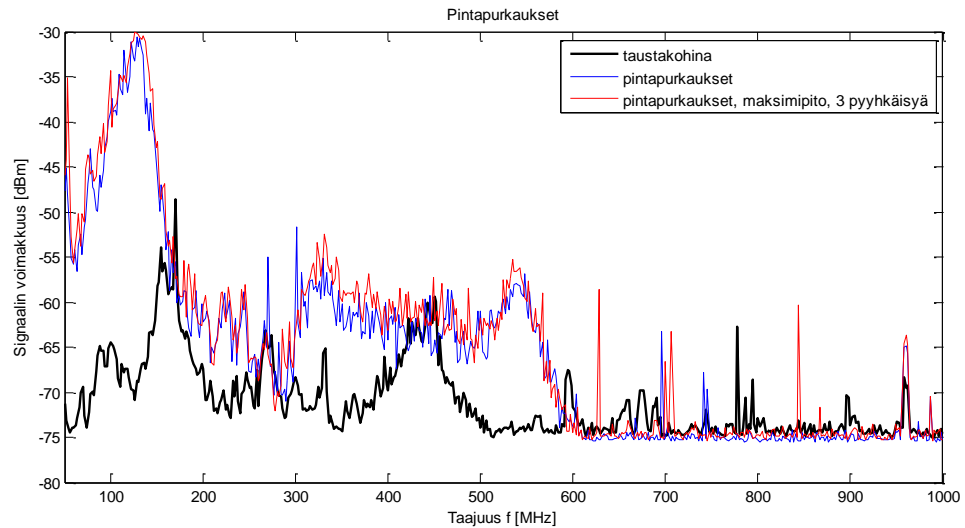
*Kuva 6.15. Koronan synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.6 testikappaletta.*

Kuvassa 6.16 on esitetty öljyssä tapahtuvan koronan taajuusspektri, joka erosi taustakohinasta selkeimmin alle 200 MHz:n taajuudella, kuten ilmassakin tapahtuva korona. Lisäksi 200–400 MHz:in taajuusalueella esiintyi pieniä poikkeamia ympäristön taustatasosta. Nämä pienet poikkeamat johtunevat öljyn hajotessa syntyvistä kaasukuplista, joissa tapahtuu heikkoja ontelopurkauksia.



*Kuva 6.16. Öljyssä tapahtuvan koronan synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.4 testikappaletta.*

Kuvassa 6.17 on esitetty lasipinnalla tapahtuvien pintapurkausten taajuusspektri. Mittauksen perusteella voidaan todeta, että purkaukset esiintyivät selkeimmin 0–150 MHz:in ja 300–600 MHz:in taajuusalueilla. Pintapurkauksien taajuusspektri ei vaihdellut mittaukskertojen välillä, vaan spektri oli hyvin vakaa.



*Kuva 6.17. Pintapurkauksien synnyttämä taajuusspektri. Mittauksessa käytettiin kuvan 6.8 testikappaletta.*

## 7 Mittaukset sähköasemilla

---

*Tässä diplomityössä tein RFI-mittauksia 13:lla kantaverkon sähköasemalla. Mittausten tavoitteena oli saada käytännön kokemusta RFI-menetelmästä, PDS100-mittalaitteesta sekä pyrkiä havaitsemaan ja paikantamaan suurjännitelaitteet, joissa esiintyy osittaispurkauksia. Luvun alussa esitellään tyypillisen mittauksen kulku sähköasemalla, minkä jälkeen esitetään mittaustulokset.*

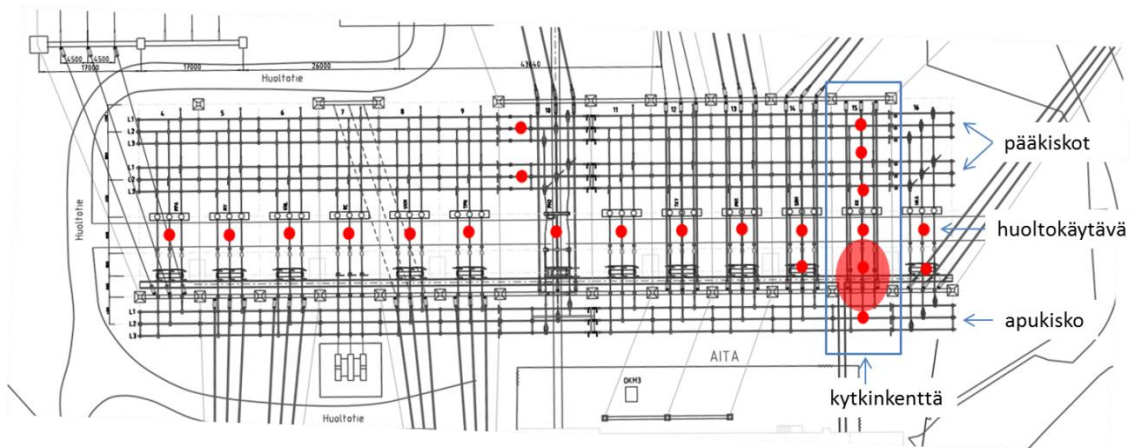
### 7.1 Mittauksien suorittaminen sähköasemalla

Sähköasemalla tapahtuvat mittaukset alkavat mittaamalla niin sanottu referenssimittaus eli ympäristössä normaalisti esiintyvä taustakohinan taajuusspektri. Mittaus on tehtävä riittävän kaukana suurjännitteisistä laitteista, jotta mahdolliset osittaispurkaukset eivät näy mittauksessa, mutta kuitenkin riittävän lähellä, jotta mittaus edustaa suurjännitelaitteiden läheisyydessä esiintyvää ympäristön taustakohinaa. Tämä taustatason mittaus toimii referenssitasona, jota vasten suurjännitelaitteiden vierestä mitattuja spektrejä verrataan. Sopiva etäisyys referenssimittaukselle on noin 50–100 metriä suurjännitteisistä osista, ja usein mittaus on kätevä suorittaa esimerkiksi sähköaseman portilta.

Referenssimittaus suoritetaan käyttämällä huippuarvoilmaisinta esimerkiksi 75 millisekunnin viipymisajalla. Mittaus suoritetaan koko taajuuskaistan pyyhkäisyllä. Erillisellä SPAM-valinnalla (*Separate Peak and Average Mode*) voidaan mitata erikseen huippu- ja keskiarvospektrit, minkä avulla voidaan tunnistaa keskiarvotehoa sisältävät tietoliikennesignaalit. Mitattu referenssisignaali tallennetaan ja siirretään näkyviin näytön taustalle. Kun referenssimittaus on tallennettu, mittalaitteen pyyhkäisyajan voi laskea 40 millisekuntiin varsinaisten mittauksien nopeuttamiseksi.

Kuvitellaan seuraavaksi tilanne, jossa laajan 110 kV:n kytkinlaitoksen yhdessä virtamuuntajassa esiintyy osittaispurkauksia. Tehokas tapa paikantaa tämä kenttä PDS100-mittalaitteella on jakaa tutkittavan ulkokytkinlaitoksen mittaus kahteen osaan: kytkinlaitoksen yleiskatsaukseen ja osittaispurkaussignaalien tarkkaan paikantamiseen.

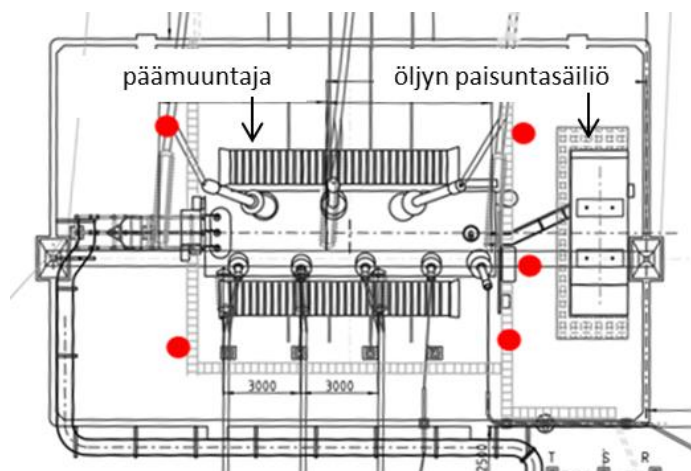
Yleiskatsauksessa kuljetaan ulkokytkinlaitos huoltokäytävää pitkin leveyssuunnassa ja tekemällä mittauksia kunkin kentän kohdalla katkaisijan ja virtamuuntajan välissä. Kävelemällä kytkinlaitos läpi leveyssuunnassa, saadaan nopeasti yleiskäsitys siitä, millä kohdalla kytkinlaitosta purkaussignaali on voimakkain. Kuvassa 7.1 on esitetty edellä esitetyllä tavalla tehdyn mittauksen mittauspisteet sekä kohta, jossa referenssistä poikkeava signaali oli voimakkain leveyssuunnassa.



*Kuva 7.1. 110 kV:n kytkinlaitos kuvattuna ylhäältä päin. Pienillä punaisilla pisteillä on merkitty mittauspisteitä. Isolla punaisella pisteellä on merkitty aluetta, josta löytyi voimakas osittaispurkaussignaali.*

Kun purkauskohta on paikannettu kytkinkentän tarkkuudella, siirrytään yksityiskohtaisempaan tarkasteluun, joka on tehty kuvassa 7.1 sinisellä merkityssä kentässä. Yksityiskohtaisessa tarkastelussa liikutaan aluksi löydettyä kenttää pitkittäissuunnassa, jolloin voidaan paikantaa se kentän kohta, jossa purkaussignaali on voimakkain. Kun epäilty kohta on löytynyt, voidaan vielä yrittää paikantaa, minkä vaiheen vieressä signaali on voimakkain. Yksityiskohtaisemmassa tarkastelussa voidaan käyttää hyväksi myös suuntaavia antennoja tai maadoitusjohdon ympärille laitettavaa HFCT-mittapäätä. Mittauksista tallennetaan aina taajuusspektrit sekä tapauskohtaisesti aikatason signaali, jolla voidaan varmistua osittaispurkausten synnyttämistä purkauspulsseista.

Päämuuntajien mittaaminen tapahtuu mittaamalla muuntaja jokaisesta kulmasta sekä käämikytkimen ohjaimen vierestä kuvan 7.2 esittämällä tavalla. Muuntajan läpiviennit voidaan mitata öljyn paisuntasäiliön huoltotasolta. Kiskojännitemuuntajat, reaktorit, kaapelipäätteet ja muut yksittäiset kohteet mitataan yksittäistapauksina läheltä kyseistä kohdetta siten, että mitattavan kohteen ja mittarin välillä on näköyhteys.



*Kuva 7.2. Päämuuntaja kuvattuna ylhäältäpäin. Päämuuntajat mitataan muuntajan jokaisesta kulmasta sekä käämikytkimen ohjaimen vierestä kuvan osoittamista pisteistä.*

## 7.2 Mittaustulokset

RFI-mittauksia tehtiin 13:lla kantaverkon sähköasemalla pääosin Uudenmaan alueella. Mittauskohteet on esitetty taulukossa 7.1. Taulukkoon on merkitty sähköasema, mittauskertojen lukumäärä, löytyneet osittaispurkaushavainnot, epäilty vikapaikka ja epäilty purkaustyyppi.

*Taulukko 7.1. Mittauskohteet ja havainnot*

| Asema       | Kerrat | Havainnot | Epäilty vikapaikka                           | Epäilty purkaustyyppi            |
|-------------|--------|-----------|--|----------------------------------|
| Anttila     | 2      | 1         | 400 kV:n virtamuuntaja                       | sisäinen                         |
| Espoo       | 3      | 3         | 400 kV:n kiskojännitemuuntaja                | kipinäpurkaus                    |
|             |        |           | 400 kV:n johtojännitemuuntaja                | kipinäpurkaus                    |
|             |        |           | 110 kV:n kiskoliitin                         | kipinäpurkaus                    |
| Forssa      | 1      | 2         | 400 kV:n erotin                              | kipinäpurkaus                    |
|             |        |           | 110 kV:n virtamuuntaja                       | kipinäpurkaus                    |
| Kangasala   | 1      | 2         | 20 kV:n kaapelipäätteet<br>(400 kV:n kenttä) | sisäinen<br>(kipinäpurkaus)      |
| Nurmijärvi  | 1      | 1         | 400 kV:n kiskopääty                          | kipinäpurkaus                    |
| Ruotsinkylä | 2      | 1         | 110 kV:n erotin                              | kipinäpurkaus                    |
| Tammisto    | 1      | 2         | 110 kV:n erotin<br>(20 kV:n kenttä)          | kipinäpurkaus<br>(kipinäpurkaus) |
|             |        |           | (400 kV:n katkaisija)                        | (kipinäpurkaus)                  |
| Olkiluoto   | 1      | 1         | (400 kV:n katkaisija)                        | (kipinäpurkaus)                  |
| Virkkala    | 2      | ei        | -  | -                                |
| Karjaa      | 1      | ei        | -  | -                                |
| Leppävaara  | 1      | ei        | -  | -                                |
| Naantali    | 1      | ei        | -  | -                                |
| Porvoo      | 1      | ei        | -  | -                                |

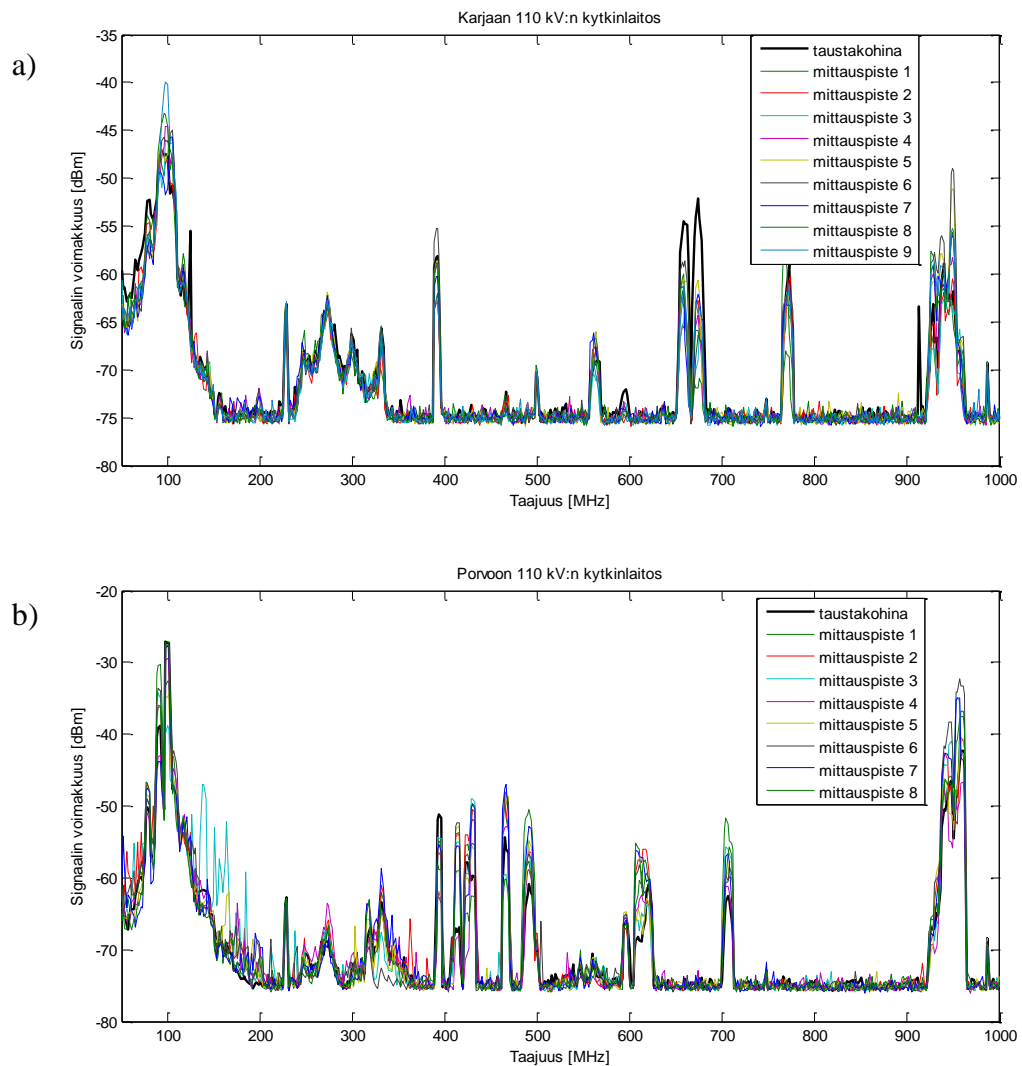
Kuten taulukosta 7.1 nähdään, mittauksissa löytyi yhteensä 13 osittaispurkauksiin viittaavaa havaintoa. Kymmenen näistä havainnoista pystyttiin paikantamaan, mutta kolme kaarisuluilla merkittyä vikapaikkaa oli epämääräisempiä eikä purkaussignaalin tarkkaa syytä tai sijaintia pystytty luotettavasti arvioimaan. Viisi asemaa havaittiin kokonaan osittaispurkausvapaiksi. Mitatun laitekannan ikä vaihteli 0–40 vuoden välillä, mutta mittauksen perusteella vanhemmasta laitekannasta ei löytynyt sen enempää osittaispurkauksia kuin uudemmista laitteista. Mittausolosuhteet vaihtelivat kesän +25 °C:n lämpötilasta talven –10 °C:n lumisiin olosuhteisiin.

Seuraavissa alaluvuissa 7.2.1–7.2.8 käydään tarkemmin läpi löydetty osittaispurkaushavainnot. Epäilyt vikakohteesta ja purkaustyyppistä perustuvat signaalin vaimentumiseen, kirjallisuudesta ja laboratoriomittauksista saatujen spektrimuotojen vertailuun sekä laite- ja asema-asiantuntijoiden arvioihin mahdollisista vikapaikoista. Liitteessä B esitettyjä aikatazon mittauksia käytettiin vahvistamaan osittaispurkauspulssien esiintyminen epäillyn vikapaikan läheisyydessä. Vikaepäilyt pyrittiin tutkimaan ja vahvistamaan muilla mittausmenetelmillä tai korjauksilla silloin, kun kohteelle löytyi sopiva menetelmä ja kyseiselle verkon osalle oli mahdollista saada käyttökeskeytys.

### 7.2.1 Osittaispurkauksista vapaat kohteet

Kokonaan osittaispurkauksista vapaat sähköasemat (5 kpl) oli helppo todeta mittauksissa, sillä näissä kohteissa mitatut signaalin voimakkuudet eivät poikenneet yhdessäkään mittauspisteessä asemaympäristön normaalista taustakohinasta. Kuvassa 7.3 on esimerkit kahdesta osittaispurkauksista vapaasta kytkinlaitoksesta. Molempien kuvien mittaukset on tehty 10 metrin välein kulkien huoltokäytävää pitkin. Yhdessäkään mittauspisteessä signaalin voimakkuus ei poikennut kauempana kohteesta mitatusta ympäristön normaalista taajuusspektristä.

Molemmista kuvista nähdään myös erinomaisesti, etteivät tietoliikenteen käyttämät taajuusalueet häiritse osittaispurkausmittauksia, sillä tietoliikenne käyttää kapeakaistaisia signaaleita, jotka on helppo tunnistaa mittaustuloksista. Esimerkiksi kuvassa 7.3 a) nähdään tietoliikennesignaaleita 390, 660, 670, 770 ja 940 MHz:n taajuuksilla.



*Kuva 7.3. a) Karjaan ja b) Porvoon 110 kV:n kytkinlaitoksilla tehtyjen mittausten taajuusspektrit. Taajuusspektrit eivät poikenneet ympäristön taajuusspektristä yhdessäkään mittauspisteessä.*

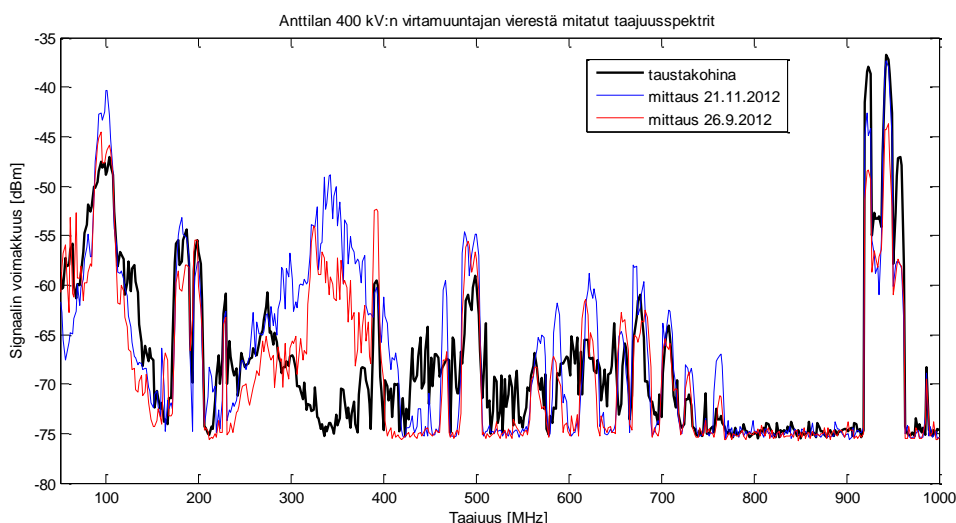


### 7.2.2 Anttilan 400 kV:n virtamuuntaja

Anttilan sähköaseman uuden 400 kV:n kytkinlaitoksen kaksi kytkinkenttää otettiin käyttöön syksyllä 2012. Kaksi viikkoa käyttöönoton jälkeen tehdyssä RFI-mittauksessa löydettiin toisen kytkinkentän virtamuuntajien vierestä signaali, joka poikkesi taustakohinasta noin 15 dB taajuuskaistalla 300–400 MHz.

Mittaus toistettiin kaksi kuukautta myöhemmin, jolloin mitattu signaali oli noin 5 dB voimakkaampi. Uusintamittauksen yhteydessä vikakohtaa rajattiin myös suuntaavalla antennilla, jonka perusteella yhden vaiheen virtamuuntajan signaali oli selkeästi hallitseva. Virtamuuntajan vieressä tehdyt taajuustason mittaukset on esitetty kuvassa 7.4.

Jos kuvan 7.4 taajuusspektriä vertaa luvun 6.3 laboratoriomittauksiin ja luvun 4.3 muissa tutkimuksissa mitattuihin taajuusspektreihin, voidaan epäillä virtamuuntajan sisäistä vikaa, koska taajuusspektri on rajoittunut alle 400 MHz:n taajuudelle. Kipinäpurkaukset synnyttävät tyypillisesti koko taajuuskaistan levyisen signaalin.



*Kuva 7.4. Virtamuuntajan vierestä mitatut taajuusspektrit. Taajuudella 300–400 MHz on 15–20 dB:n poikkeama taustakohinasta.*

Epäilyä tukee se, että yleisesti tämän tyyppin virtamuuntajien tehdaskokeissa on havaittu lähellä hylkäysrajaa olevia osittaispurkaustasoja ja häviökulmamittauksen arvoja. Esimerkiksi RFI-mittauksessa havaitun virtamuuntajan tehdastestissä mitattiin 9 pC:n osittaispurkaustaso, kun hylkäysraja on 10 pC. [8]

Vikaepäilyn vahvistamiseksi jokaisen vaiheen virtamuuntajasta otettiin öljynäyte, jolle suoritettiin öljyanalyysi vikaepäilyn vahvistamiseksi. Liitteessä C esitettyjen öljyanalyysin tulosten perusteella kaikkien kolmen virtamuuntajan kaasupitoisuudet olivat kuitenkin selvästi alle suositusarvojen eli kyseisissä virtamuuntajissa ei ollut sisäisiä osittaispurkauksia. RFI-mittauksessa havaittu osittaispurkaussignaali tulee siis virtamuuntajan lähietäisyydeltä jostakin muusta kohteesta, mikä jää myöhemmin tutkittavaksi.

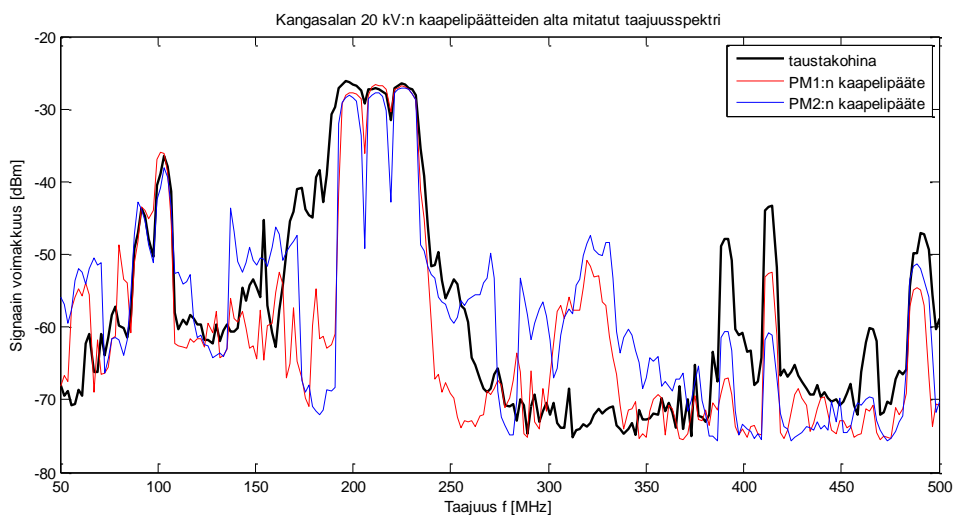
### 7.2.3 Kangasalan 20 kV:n kaapelipäätteet

Mittauksissa Kangasalan kahden päämuuntajan erillisten muuntajabunkkerien sisäpuolella havaittiin molempien muuntajien 20 kV:n tertiääriin liittyvien kaapelipäätteiden alla taustakohinasta poikkeavat signaalit. Kuvassa 7.5 esitetyt taajuusspektrit poikkesivat taustakohinasta noin 20–24 dB kapealla 250–350 MHz:n taajuuskaistalla. Aikatason mittauksessa 330 MHz:n taajuudella esiintyi osittaispurkauksille tyypillisiä purkauspulsseja.

Signaalit olivat peräisin bunkkerien sisäpuolelta, koska betoniset seinät vaimensivat ulkopuolelta tulevia signaaleita voimakkaasti eikä bunkkereiden ulkopuolella havaittu ympäristöstä poikkeavia signaaleita. Osittaispurkaukset olivat todennäköisimmin peräisin muuntajan tertiääriin liittyvistä kaapelipäätteistä eikä muuntajista tai niiden läpivienneistä, koska signaali oli selkeästi voimakkain kaapelipäätteiden alla.

Kaapelipäätteet ovat usein alttiita vioille. Esimerkiksi aiemmin syksyllä juuri Kangasalan sähköasemalla tuhoutui vain kolme vuotta vanha kaapelipääte. Syksyllä tuhoutuneen kaapelipäätteen jatkoselvityksessä todettiin, että asennusvaiheessa tapahtuva päätteen lämmittäminen oli jäänyt vajaaksi. Tämän seurauksena rakenteeseen oli voinut jäädä osittaispurkauksille alttiita vikapaikkoja, jotka ajan myötä johtivat läpilyöntiin hohtosuojan reunasta kosketussuojan lankoihin. [31]

Epäillyille kaapelipäätteille ei pystytty tekemään muita diagnostisia mittauksia, jotka olisivat vahvistaneet RFI-mittauksella tehdyt osittaispurkaushavainnot. Ainoa realistinen vaihtoehto olisi irrottaa kaapelipäätteet ja testata ne laboratorio-olosuhteissa.



Kuva 7.5. Kangasalan 20 kV:n kaapelipäätteiden alta mitatut taajuusspektrit. Taajuudella 250–350 MHz on 20 dB:n poikkeama taustakohinasta.

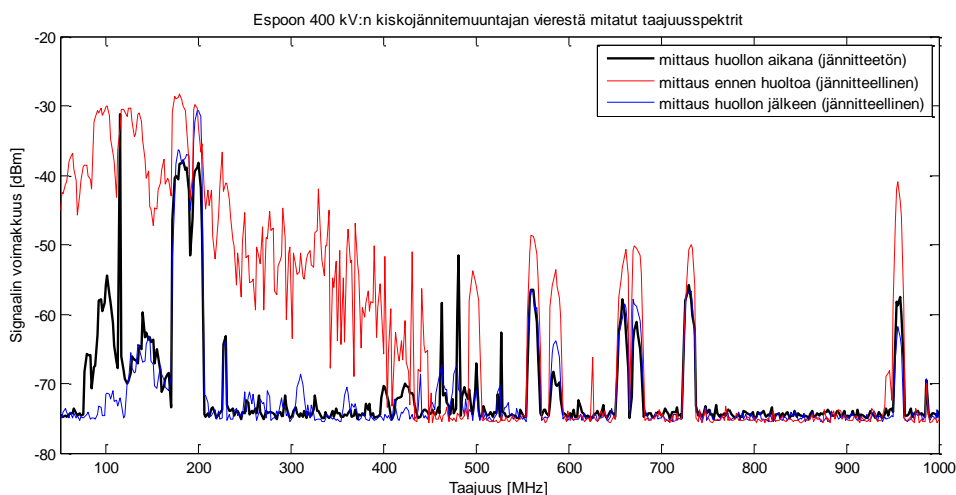
### 7.2.4 Espoon 400 kV:n kiskojännitemuuntaja

Espoon 400 kV:n kytkinlaitoksen kiskojännitemuuntajien vieressä havaittiin 0–500 MHz:n taajuudella ympäristön taustatasosta poikkeava spektrimuoto. Mitattu taajuusspektri muistutti laboratoriossa mitattuja kosketushäiriön ja kelluvan potentiaalin synnyttämien signaalien taajuusspektrejä. Taajuudella 335 MHz tehdyissä aikatason mittauksissa näkyi osittaispurkauksille tyypillisiä purkauspulsseja. Yhden vaiheen jännitemuuntajan yläosa rämisi, joten vikapaikan pystyi tässä tapauksessa rajaamaan tiettyyn jännitemuuntaajaan.

Samanlainen räminä oli havaittu Espoossa toisen pääkiskon jännitemuuntajasta vuonna 2001, jolloin vika paikannettiin jännitemuuntajan yläpään alumiinikaulukseen, joka ei ollut galvaanisessa yhteydessä jännitteisiin osiin. Räminä korjattiin lukitsemalla kaulus paikoilleen ja varmistamalla galvaaninen yhteys.

Näiden havaintojen perusteella kyseiselle kiskojännitemuuntajalle toteutettiin samanlainen huolto kuin vuonna 2001. Kuvassa 7.6 on esitetty kiskojännitemuuntajan vierestä mitatut signaalit ennen ja jälkeen huollon sekä huollon aikana. Kuvasta nähdään, että huolto poisti punaisen vikasignaalin kokonaan eli purkaus aiheutui jännitemuuntajan yläosan kelluvasta potentiaalista, joka synnytti kipinäpurkauksia.

Huollon yhteydessä tehdyssä RFI-mittauksessa löytyi myös toinen samanlainen yläosastaan rämisevä johtojännitemuuntaja eli kyseessä on tyypikohtainen ongelma.



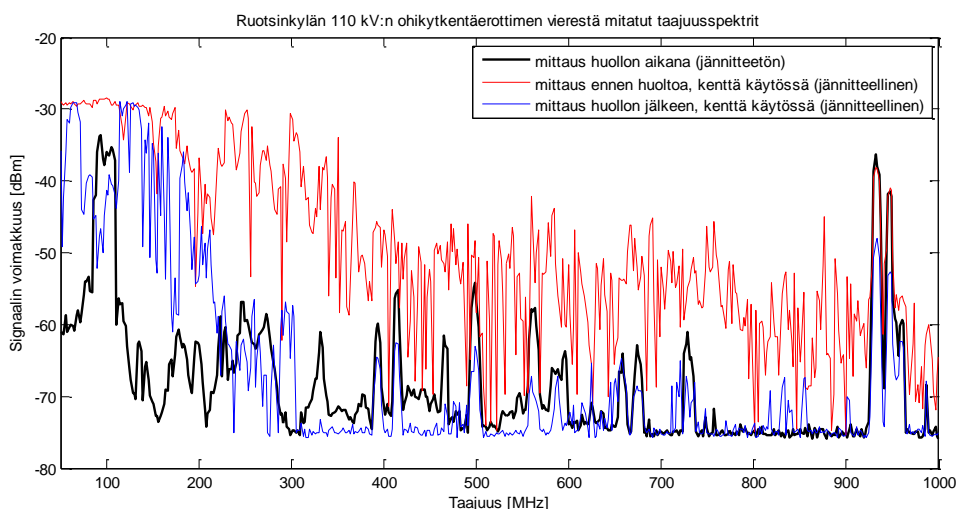
Kuva 7.6. Espoon 400 kV:n kiskojännitemuuntajan vierestä mitatut taajuusspektrit ennen ja jälkeen huollon sekä huollon aikana. Taajuudella 0–500 MHz esiintynyt punainen häiriöspektri poistui huollossa.

### 7.2.5 Ruotsinkylän 110 kV:n ohikytkentäerotin

Ruotsinkylän 110 kV:n kytkinlaitoksella mitattiin yhden kytkinkentän kohdalla ympäristön taustakohinasta koko 0–1000 MHz:n taajuusalueella poikkeava signaali. Vikapaikka paikannettiin kentän suuntaisilla mittauksilla ohikytkentäerottimeen.

Mitatun signaalin taajuusspektri muistutti laboratoriossa kosketushäiriön ja kelluvan potentiaalin synnyttämiä taajuusspektrejä. Lisäksi asematarkastuksessa oli havaittu erottimen virtateinä toimivissa kuparipalmikoissa hapettumisen ja säikeiden rispaantumisen kaltaisia vanhenemisen merkkejä. Näistä syistä erottimelle toteutettiin huolto, jonka tavoitteena oli selvittää, pystyttiinkö vikapaikka määrittämään oikein sekä tunnistamaan vikasignaali kipinäpurkauksen aiheuttamaksi. Huollossa vaihdettiin kyseisen erottimen kuparipalmikot sekä puhdistettiin ja kiristettiin liitokset.

Kuvassa 7.7 on esitetty erottimen vierestä mitatut taajuusspektrit ennen ja jälkeen huollon sekä huollon aikana. Kuvasta nähdään, että punainen vikasignaali poistui, kun kenttä kytkettiin jännitteettömäksi huoltoa varten. Lisäksi nähdään ennen ja jälkeen huollon tehdyistä mittauksista, että huolto poisti koko taajuuskaistalla olleen vikasignaalin melkein kokonaan. Aikatazon mittauksissa purkauspulsseja esiintyi huollon jälkeenkin, mutta noin 25 dB heikompina. Näin ollen voidaan todeta, että kyseinen erotin oli signaalin aiheuttaja ja vika todennäköisesti johtui kosketushäiriön tai kelluvan potentiaalin aiheuttamista kipinäpurkauksista.



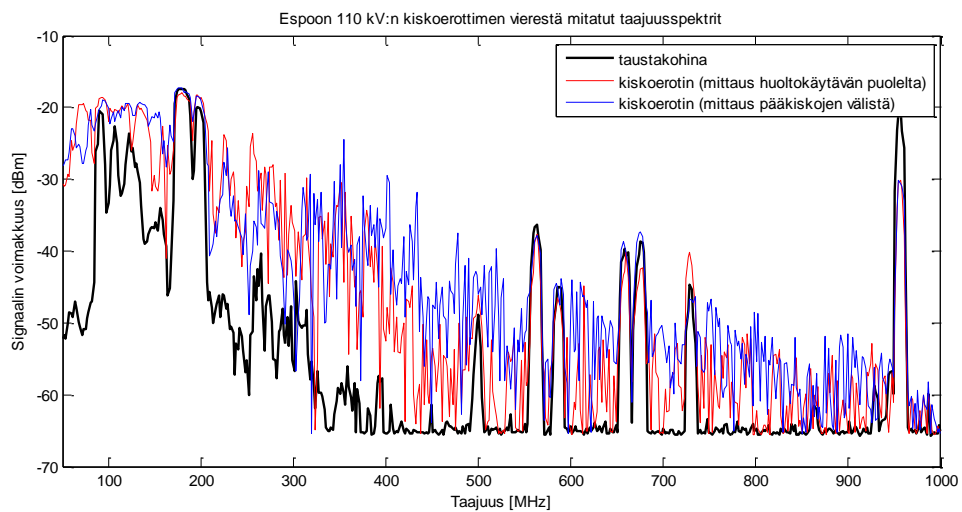
*Kuva 7.7. Ruotsinkylän 110 kV:n erottimen vierestä mitatut taajuusspektrit ennen ja jälkeen huollon sekä huollon aikana. Koko taajuuskaistalla esiintynyt punainen häiriöspektri poistui huollossa.*

### 7.2.6 Espoon 110 kV:n kiskoliitin

Espoon 110 kV:n kytkinlaitoksen huoltokäytävällä mitattiin yhden kytkinkentän kohdalla ympäristön taustakohinasta koko 0–1000 MHz:n taajuuskaistalla poikkeava signaalimuoto. Vikapaikka tarkentui kentän suuntaisessa mittauksessa toisen kiskoerottimen lähelle. Kuvassa 7.8 on esitetty kiskoerottimen molemmilta puolilta mitatut taajuusspektrit. Taajuudella 430 MHz tehdyissä aikatazon mittauksissa esiintyi osittaispurkauksille tyypillisiä purkauspulsseja.

Kun kuvan 7.8 taajuusspektrejä verrataan luvun 6.3 laboratoriomittauksiin, havaitaan että spektri muistuttaa kosketushäiriön ja ontelopurkauksien synnyttämiä spektrejä. Koska erottimessa tai sen läheisyydessä ei ole ontelopurkauksille alttiita vikapaikkoja, on todennäköisintä, että kyseessä on kipinäpurkauksen synnyttämä signaali.

Vikapaikan tarkemmassa tutkimuksessa havaittiin, että kiskoerottimen vieressä olevan tukieristimen liittimen ja kiskoputken välillä ei ole galvaanista kosketusta kiskon heilahtelua vaimentavien kumieristeiden vuoksi. Liittimen ja kiskoputken välillä on siten jännite-ero, joka aiheuttaa kipinäpurkauksia sähkökentän voimakkuuden ylittyessä. Jatkossa on suositeltavaa käyttää liittimiä, joissa liitin ja kiskoputki ovat galvaanisessa yhteydessä toisiinsa.

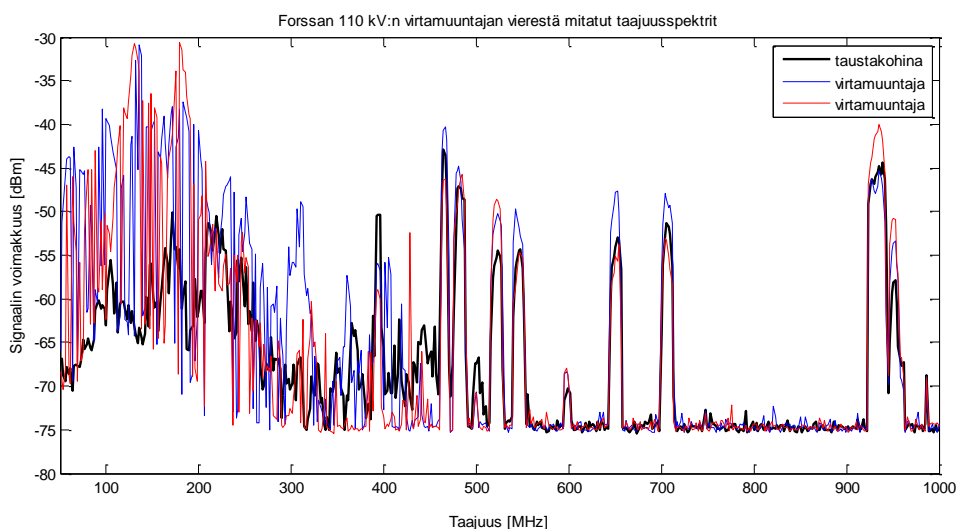


Kuva 7.8. Espoon 110 kV:n kiskoerottimen molemmilta puolilta mitatut taajuusspektrit.

### 7.2.7 Forssan 110 kV:n virtamuuntaja

Forssan 110 kV:n kytkinlaitoksen huoltokäytävällä mitattiin ympäristön taustakohinasta poikkeava signaalimuoto yhden kytkinkentän kohdalla. Vikapaikka tarkentui kentän suuntaisessa mittauksessa öljyeristeisiin virtamuuntajiin, joiden molemmilta puolin mitatut taajuusspektrit on esitetty kuvassa 7.9. Kuvasta nähdään, että taajuusspektrit poikkesivat taustakohinasta 0–400 MHz:n taajuusalueella.

Kuvien 4.6 ja 6.11 laboratoriomittauksissa havaittiin, että öljyyn upotetussa prespaanissa esiintyneet osittaispurkaukset synnyttivät signaalin, jonka dominoivat komponentit olivat 0–400 ja 0–500 MHz:n taajuusalueilla. Tämän perusteella voisi epäillä virtamuuntajan sisäistä purkausvikaa. Mitattu taajuusspektri muistuttaa kuitenkin myös kuvan 7.6 kellovasta potentiaalista aiheutuvaa kipinäpurkausta, mikä havaittiin Espoon 400 kV:n kiskojännitemuuntajissa. Näin ollen on perustellumpaa epäillä ulkoista kipinäpurkausta. Koska havainto on tehty virtamuuntajan vieressä, vikaepäily on suositeltavaa varmistaa tarkistamalla mahdolliset kellovat potentiaalit ja huonot liitokset virtamuuntajan läheisyydessä.

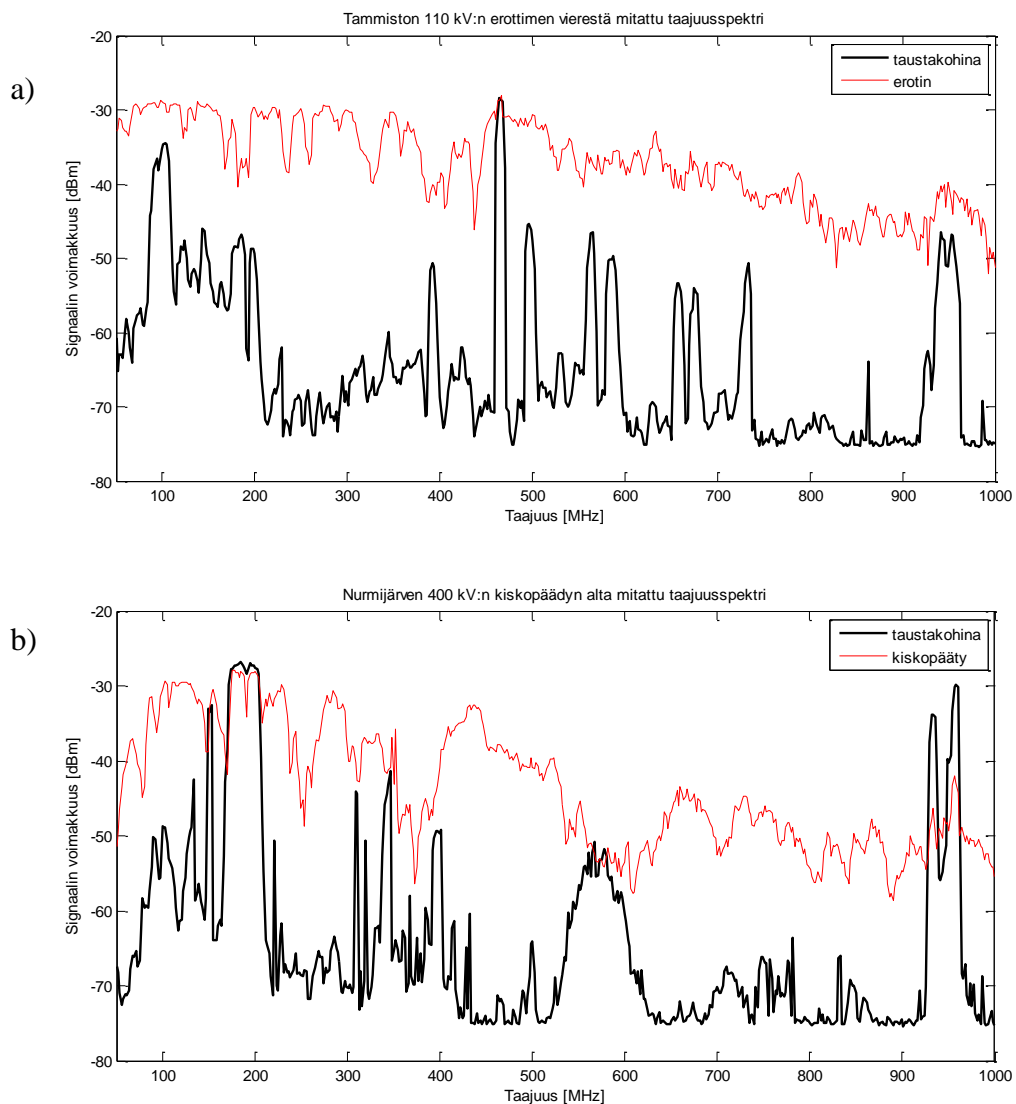


*Kuva 7.9. Forssan 110 kV:n virtamuuntajien molemmilta puolilta mitatut taajuusspektrit, jotka poikkesivat taustakohinasta 0–400 MHz:n taajuusalueella.*

### 7.2.8 Tammiston ja Nurmijärven kipinäpurkaukset

Tammiston 110 kV:n kytkinlaitoksen kiskoerottimen vierestä ja Nurmijärven 400 kV:n kytkinlaitoksen kiskopäädystä mitattiin taustakohinasta koko 0–1000 MHz:n taajuusalueella poikkeavat taajuusspektrit. Taajuusspektrit on esitetty kuvassa 7.10. Aikatason mittauksissa esiintyi myös osittaispurkauksille tyypillisiä purkauspulsseja.

Molemmat taajuusspektrit viittaisivat laboratoriomittausten perusteella ontelo-  
purkauksien tai kosketushäiriön synnyttämiin kipinäpurkauksiin, koska signaali ulottuu koko taajuuskaistalle. Koska signaalien voimakkuus oli voimakkain kohdissa, joissa ei ole ontelopurkauksille alttiita kohtia, signaalit ovat todennäköisimmin peräisin kipinäpurkauksista.



Kuva 7.10. a) Tammiston 110 kV:n kiskoerottimen ja b) Nurmijärven 400 kV:n kiskopäädyn vierestä mitatut taajuusspektrit, jotka poikkesivat taustakohinasta koko taajuusalueella.

## 8 Analyysi mittaustuloksista ja havainnoista

---

*Tässä luvussa analysoidaan suurjännitelaboratoriossa ja sähköasemilla tekemiä radiotaajuisten osittaispurkausmittausten tuloksia ja mittauksista saatuja kokemuksia.*

### 8.1 Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittauksissa pystyttiin PDS100-mittalaitteella selkeästi havaitsemaan osittaispurkausten esiintyminen mittausalueella, mikä on laboratoriomittausten tärkein havainto. Osittaispurkaukset havaittiin siitä, että mitattu taajuusspektri poikkesi ympäristön taustakohinan spektristä kaikilla eri testikappaleilla, kun purkausten syttymisjännite ylitettiin. RFI-mittauksilla tehdyt osittaispurkaushavainnot varmistettiin galvaanisella mittauksella, jotka osoittivat osittaispurkausten olemassaolon.

Kun laboratoriossa mitattujen eri osittaispurkaustyyppien synnyttämiä taajuusspektrejä verrataan toisiinsa, havaitaan että taajuusspektrit poikkesivat toisistaan spektrin muodon ja dominoivien taajuuskomponenttien osalta. Jos laboratoriomittausten tuloksia verrataan muissa tutkimuksissa mitattuihin taajuusspektreihin, havaitaan että samantyyppisten osittaispurkausten mittaustulokset ovat samansuuntaisia. On kuitenkin huomioitava, että tämän ja muiden tutkimusten mittaustulokset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia standardoinnin puutteen vuoksi. Havainnot kuitenkin vahvistavat sen, että erityyppisten osittaispurkausten synnyttämällä signaaleilla on erilainen taajuusspektri.

Laboratoriossa mitattuja taajuusspektrejä voidaan osittain hyödyntää sähköasemamittauksissa, kun arvioidaan tuntemattoman osittaispurkauksen tyyppiä. Laboratoriossa mitatut korona- ja kipinäpurkaukset edustavat hyvin sähköasemilla tapahtuvia ulkoisia purkauksia, koska purkauksia synnyttävät rakenteet ovat periaatteessa samanlaisia. Laboratoriossa ja sähköasemilla mitattujen sisäisten osittaispurkausten taajuusspektrit saattavat sen sijaan olla erilaisia, koska laboratoriossa käytetyt testikappaleet ja sähköasemilla olevien suurjännitelaitteiden rakenteet poikkeavat toisistaan. Yleisesti luotettava sormenjälkipankki vaatii enemmän mittausdataa todellisissa suurjännitelaitteiden sisäisistä osittaispurkauksista.

PDS100:n aikatazon mittauksia voidaan käyttää purkauspulssien olemassaolon vahvistamiseen, mutta purkauspulssien sijaintia ei voida paikantaa suhteessa käyttöjännitteen jaksoon. Myöskään eri puolijaksoilla esiintyvien purkausten voimakkuuden arviointia ei voida pitää riittävän luotettavana, jotta PDS100:n aikatazon mittauksia voisi käyttää osittaispurkaustyyppin tunnistamiseen. Tämä poikkeaa Lehtion [2] tekemästä havainnosta, että paras tapa purkaustyyppin tunnistamiseen on spektrianalyysaattorilla suoritettava aikatazon mittaus. Ero havaintojen välillä johtuu siitä, että Lehtion tutkimuksessa käytetyllä mittauslaitteistolla pystyttiin mittaamaan purkauspulssien sijoittuminen vaihejännitteeseen nähden toisin kuin tämän diplomityön PDS100-mittalaitteistolla.



## 8.2 Sähköasemamittaukset

Sähköasemilla tehtyjen mittausten perusteella RFI-menetelmällä pystytään havaitsemaan ja paikantamaan osittaispurkauksia. Sähköasemamittauksissa löytyi 13 osittaispurkauksiin viittaavaa havaintoa, joista kymmenen pystyttiin paikantamaan hyödyntämällä signaalin vahvistumista purkauspaikkaa lähestyttäessä. Ympärisäteilevällä antennilla pystyttiin paikantamaan signaalilähde kolmivaiheisen laiteklusterin alueelle, mutta yksittäiseen vaiheeseen liittyvän laitteen tarkkuuteen ei päästy.

Kolme purkaussignaalia oli epämääräisiä eikä niitä pystytty paikantamaan tietylle alueelle luotettavasti. Useiden lähekkäin olevien osittaispurkauslähteiden paikantaminen voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta pelkästään ympärisäteilevällä antennilla, jos mitattu signaalin voimakkuus ei vahvistu mihinkään yksiselitteiseen suuntaan. Suuntaavilla antennilla ja HFCT-mittapäällä pystytään rajaamaan purkauspaikkaa, mutta ne eivät sovellu koko aseman mittaamiseen. Paikantaminen on sitä helpompaa, mitä suuremmat etäisyydet eri laitteiden välillä on. Tästä johtuen 400 kV:n kytkinlaitoksilla paikantaminen on helpompaa kuin 110 kV:n kytkinlaitoksilla.

Kymmenestä onnistuneesti paikannetusta purkauksesta kahdeksan arvioitiin johtuvan ulkoisista kipinäpurkauksista. Kipinäpurkaushavainnot vahvistettiin kahdessa tapauksessa tekemällä huollot, jotka poistivat purkauksien aiheuttamat häiriöspektrit. Kahden vahvistetun referenssitapauksen perusteella voidaan muita kuutta kipinäpurkaushavaintoja pitää luotettavina.

Sähköasemamittauksissa havaittiin kaksi sisäisiin osittaispurkauksiin viittaavaa signaalia virtamuuntajista ja kaapelipääteistä. Anttilan sähköaseman virtamuuntajille tehdyn öljyanalyysin perusteella epäily sisäisestä osittaispurkauksesta oli kuitenkin virheellinen ja aiheutti tarpeettoman siirtokeskeytyksen. Kangasalan kaapelipäätteille ei pystytty tekemään muita diagnostisia mittauksia, joten epäily sisäisistä purkauksista jäi toistaiseksi varmistamatta.

Varmistetuista sähköasemalaitteiden sisäisistä osittaispurkauksista ja niiden synnyttämistä taajuusspektreistä ei siis saatu tässä diplomityössä riittävästi havaintoja. Tämä ei välttämättä johdu mittausten menetelmästä, vaan siitä, että kantaverkon sähköasemalaitteet ovat hyvässä kunnossa. Fingridin sähköasemalaitteissa havaitaan vuosittain noin yksi vakava sisäinen vika [8], joten todennäköisyys löytää riittävään pitkälle edennyt sisäinen osittaispurkausvika on hyvin pieni. Aiemman tutkimustiedon, muiden verkkoyhtiöiden kokemusten ja tämän työn laboratoriomittausten perusteella on kuitenkin todennäköistä, että myös sisäiset osittaispurkaukset pystytään havaitsemaan RFI-menetelmän avulla.

RFI-menetelmällä tehdyt osittaispurkaushavainnot voidaan luokitella vaarattomiin ja tarkempaa diagnoosia vaativiin vaarallisiin vikaepäilyihin. Luokittelu tapahtuu yhdistelemällä tietoa eri osittaispurkausten synnyttämistä taajuusspektreistä epäiltyyn vikapaikkaan ja aiempiin vikatietoihin. Jos signaalilähde paikantuu esimerkiksi erottimen lähelle ja kyseisestä kohdasta mitataan koko taajuuskaistan levyinen

voimakas signaali, kyseessä on todennäköisesti huonosta liitoksesta tai kelluvasta potentiaalista aiheutuva kipinäpurkaus. Jos purkaussignaali löytyy vuorostaan muuntajien, mittamuuntajien, läpivientien tai kaapelipäätteiden läheisyydestä, on mahdollista että kyseessä on vaarallinen sisäinen vika, joka on aina syytä tutkia tarkemmin.

Aseman koko ja havaintojen määrä vaikuttivat luonnollisesti mittauksen kestoon. Tyypillisen 400/110 kV:n muuntoaseman tutkiminen vei noin yhden henkilötyöpäivän sisältäen mittaukset sekä niiden analysoinnin ja raportoinnin. RFI-mittausten kustannuksia arvioitaessa voidaankin käyttää yhtä henkilötyöpäivää per asema.

Koronapurkaukset tai tietoliikennesignaalit eivät häirinneet RFI-mittauksia, koska koronapurkaukset esiintyivät alle 200 MHz:n taajuudella ja tietoliikennesignaalit pystyttiin tunnistamaan keskiarvoilmaisimen sekä signaalin kapeakaistaisuuden avulla.

RFI-mittaukset pystytään suorittamaan kevyellä ja helppokäyttöisellä mittalaitteistolla kuten PDS100:lla, joka kesti ympäristöolosuhteiden rasitukset kesä- ja talviolosuhteissa. Vesi, pöly tai pakkanen eivät kokemuksen perusteella vaikuttaneet laitteen suorituskyykyyn. Mittalaitteen suuria näppäimiä pystyi käyttämään hyvin myös hansikkaat kädessä. Laitteen heikoin kohta on antenniliitin, joka löystyi käytön aikana siten, että antenni pyörähti ajoittain osoittamaan alaspäin. Ratkaisuna tähän ongelmaan siirryttiin käyttämään uutta joustavaa antennia, joka ei pysty pyörähtämään mihinkään suuntaan.

Mittauksista saatujen kokemusten perusteella ympäristöolosuhteet vaikuttavat ulkoisten purkausten esiintymiseen. Vaikutuksen suuntaa ei voida kuitenkaan luotettavasti määrittämään, koska säätilan muutos saattaa joko lisätä tai vähentää ulkoisia purkauksia. Tästä syystä mitään tiettyä säätilaa ei voida pitää merkittävästi muita parempana sisäisten osittaispurkausten havaitsemisessa. Runsas vesi- tai lumisade hankaloittaa kuitenkin mittauspisteiden merkitsemistä ja kytkinlaitoksella kulkemista, joten mittaaminen on suositeltavaa kuivissa ja lumettomissa olosuhteissa.

## 9 Johtopäätökset

---

*Tämän työn tavoitteena oli selvittää, soveltuvatko radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan. Johtopäätökset perustuvat tässä diplomityössä tehtyihin mittauksiin, havaintoihin sekä aiempaan tutkimustietoon aiheesta.*

Suurjännitelaboratoriossa ja kantaverkon sähköasemilla tehtyjen mittausten perusteella RFI-menetelmällä pystytään havaitsemaan ja paikantamaan sähköasemalaitteissa esiintyviä osittaispurkauksia. Koska radiotaajuiset osittaispurkausmittaukset eivät vaadi käyttökeskeytystä mitattavalle suurjännitelaitteelle, menetelmää voidaan käyttää osittaispurkausvikojen seulontaan isosta laitepopulaatiosta.

Radiotaajuisien osittaispurkausmittausten suorittaminen on nopeaa, mutta mittaus tulosten tulkinta ja vikojen paikantaminen vaativat näkemystä mahdollisista purkauspaikoista. Useat lähekkäin olevat osittaispurkauslähteet voivat myös vaikuttaa mittaus tuloksiin ja vaikeuttaa purkausten erottelua ja paikantamista sähköasemilla. Koronapurkaukset tai tietoliikennesignaalit eivät häiritse mittauksia, koska koronapurkaukset rajoittuvat alle 200 MHz:n taajuudelle ja tietoliikennesignaalit pystytään tunnistamaan keskiarvoilmaisimen sekä signaalin kapeakaistaisuuden avulla.

Tässä tutkimuksessa ei pystytty varmistamaan yhtään suurjännitelaitteen sisäistä osittaispurkausvikaa. Aiemman tutkimustiedon, muiden verkkoyhtiöiden kokemusten ja tämän työn laboratoriomittausten perustella on kuitenkin todennäköistä, että myös sisäiset osittaispurkaukset pystytään havaitsemaan RFI-menetelmän avulla.

Havaitun osittaispurkauksen tyyppiä ei voida päätellä pelkästään radiotaajuisilla osittaispurkausmittauksilla, koska mittaus tulosten tulkinta ei ole vielä yksiselitteistä kaikkien purkaustyyppien osalta. RFI-menetelmällä tehdyt osittaispurkaushavainnot voidaan kuitenkin luokitella vaarattomiin ja vaarallisiin tarkempaa diagnoosia vaativiin vikaepäilyihin, kun huomioidaan mitatun taajuusspektrin lisäksi vikapaikka ja aiemmat vikahavainnot. Yleisesti luotettava sormenjälkipankki vaatii enemmän mittausdataa todellisissa suurjännitelaitteiden rakenteissa tapahtuvista osittaispurkauksista.

RFI-menetelmän avulla ei voida suoraan arvioida purkausvian suuruutta tai vakavuutta eli sen avulla ei voida tehdä päätöstä huollosta tai laitevaihdesta. Epäilylle vikakohteelle voidaan kuitenkin kohdistaa muita tarkentavia diagnostisia mittauksia, jotka varmistavat osittaispurkaushavainnon ja vian vakavuuden. Väärien vikaepäilyjen tutkiminen voi aiheuttaa kuitenkin tarpeettomia käyttökeskeytyksiä, joten vikaepäilyjen on oltava hyvin perusteltuja.

Menetelmän käyttöönoton kannalta yksi kriittisimmistä tekijöistä on kunnossapito- ja käyttöorganisaatioiden valmiudet ja mahdollisuudet reagoida RFI-mittauksilla tehtyihin vakaviin osittaispurkaushavaintoihin. Menetelmällä tehtyihin havaintoihin on reagoitava määrittämällä jatkodiagnostiikka, jolloin mahdollinen vauriokehitys voidaan tunnistaa ja ehkäistä ajoissa. Reagoimista helpottavat tietyt säännöt ja kynnysehdot, joiden

mukaan toimitaan. Jos vaarallisiin vikaepäilyihin ei pystytä reagoimaan, RFI-menetelmän käyttökelpoisuus jää hyödyntämättä.

Muuntajien, mittamuuntajien, kaapelipäätteiden tai läpivientien läheisyydessä tehdyt osittaispurkaushavainnot on suositeltavaa tutkia nopeasti, koska kyseessä voi olla vaarallinen sisäinen vika. Ulkoisiin kipinäpurkauksiin viittaavia signaaleita ei sen sijaan tarvitse selvittää tai korjata heti. Niiden korjaaminen esimerkiksi seuraavan huollon yhteydessä on kuitenkin kannattavaa, koska RFI-menetelmän erottelukyky sisäisille osittaispurkauksille paranee, kun ulkoisten kipinäpurkausten määrä vähenee.

Vaikka jo yhden mittauksen perusteella voidaan havaita osittaispurkauksia, sähköasemien pitkäaikaisen seurannan avulla saadaan kattavampi kuva asemalla esiintyvistä purkaussignaaleista ja häiriölähteistä. Pitkäaikaisen seurannan avulla on mahdollista seurata osittaispurkaustilanteen kehittymistä. Esimerkiksi uuden signaalin havaitseminen voi kertoa edellisen mittauksen jälkeen alkaneesta osittaispurkausviasta. Jos RFI-menetelmällä havaittua vikaa seurataan ja seurannan aikana vikasignaalin voimakkuus kasvaa selkeästi, kyseessä voi olla etenevä vika, johon on reagoitava nopeasti.

Menetelmän voisi ottaa aluksi käyttöön yhdellä kantaverkon työalueella, esimerkiksi Uudellamaalla, ja myöhemmin laajentaa kaikille alueille. Mittaukset voisi suorittaa kerran vuodessa kaikilla sähköasemilla sekä käyttöönottojen yhteydessä. Lisäksi merkittävien vikahavaintojen tapauksissa on perusteltua tehdä seurantamittaukset useamman kerran vuodessa. Portaittaisen käyttöönoton avulla on mahdollista ensin kehittää toimintamallia yhdessä kunnossapidon palvelutoimittajan kanssa ja sen jälkeen laajentaa hyvä toimintamalli muille alueille. Menetelmän käyttöönoton alkuvaiheessa todennäköisesti tarvitaan runsaasti Fingridin näkemystä erilaisten vikasignaalien tulkitsemiseen, mutta palvelutoimittajan kokemuksen lisääntyessä menetelmän käyttö olisi riittävän rutinoitunutta ja palvelutoimittaja pystyisi itsenäiseen työhön.

Löydettyistä vioista ja signaaleista tulee kerätä sormenjälkipankkia, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa vikojen tunnistamisessa. Lisäksi on syytä pitää silmällä vuonna 2015 julkaistavaa standardiehdotusta IEC 62478 [29], joka koskee RFI- ja akustisia osittaispurkausmittauksia. Samoin aiheellista on seurata tutkimuksia, jotka käsittelevät antennilla mitatun energian ja näennäisvarauksen välistä suhdetta, jonka avulla voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa arvioida purkausvian vakavuutta nykyistä paremmin.

Edellä esitetyt johtopäätökset menetelmän soveltuvuudesta käytäntöön voidaan jakaa vahvuuksiin, heikkouksiin, mahdollisuuksiin ja uhkiin kuvan 9.1 esittämällä tavalla. RFI-menetelmä soveltuu suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan, kun lisäksi huomioidaan menetelmän heikkoudet ja uhat. Menetelmän käyttöönottoa on arvioitava myös käyttövarmuuden, henkilöturvallisuuden ja taloudellisista näkökulmista.

|   |  |
|---|--|
| <p><u>Vahvuudet</u></p> <p>mittausten suorittaminen on nopeaa ja helppoa</p> <p>purkaukset pystytään havaitsemaan ja useimmiten myös paikantamaan laiteklusterin tarkkuudella</p> <p>mittaaminen ei vaadi käyttökeskeytyksiä, joten se soveltuu isoille laitepopulaatioille</p> | <p><u>Heikkoudet</u></p> <p>mittaustulosten tulkinta ei ole vielä yksiselitteistä kaikkien vikatyyppeiden osalta</p> <p>menetelmä ei anna varmaa tietoa purkauksien voimakkuudesta</p> <p>useat lähekkäin olevat osittaispurkauslähteet voivat häiritä mittauksia</p>  |
| <p><u>Mahdollisuudet</u></p> <p>mittamuuntajien, läpivientien ja kaapelipäätteiden kunnonvalvonta</p> <p>mittausdatan ja kokemuksen myötä rakentuu sormenjälkikirjasto, joka helpottaa mittaustulosten tulkintaa</p>  | <p><u>Uhat</u></p> <p>mittaaminen vaatii kärsivällisyyttä ja näkemystä mahdollisista vikapaikoista</p> <p>käyttö- ja kunnossapito-organisaatioiden mahdollisuudet reagoida vikaepäilyihin</p> <p>väärien vikaepäilyjen aiheuttamat tarpeettomat siirtokeskeytykset</p> |

*Kuva 9.1. RFI-menetelmän vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat*

## 10 Lähdeluettelo

---

- [1] Johnstone, C. Sähköpostikeskustelu. National Grid.
- [2] Lehtio, A. "Radiohäiriömittausten soveltuvuus sähkönsiirtoverkkojen kunnonvalvontaan". Lisensiaattitutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere. 1992.
- [3] Pakonen, P. "Sähköpurkaustyypin tunnistaminen radiohäiriömittauksilla". Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere. 1992.
- [4] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. "Suurjännitetekniikka". 2. painos. Helsinki. 2003. ISBN 951-672-320-9.
- [5] Nesbitt, A., Stewart, B. G., McMeekin, S. G., Conner, S., Gamio, J. C., Liebech-Lien, K. , Kristiansen H. O., & Kråkenes, S. "A novel approach to high voltage substation surveillance using radio frequency interference measurement". Teoksessa: IEEE Electrical Insulation Conference, 2009. S. 159–163.
- [6] Judd, M. D. "Radiometric partial discharge detection". Teoksessa: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. S. 1025–1030.
- [7] Pakonen P. & Lahti, K. "Kangasalan 400 kV sähköaseman radiohäiriö- ja äänitasojen pitkäaikaiskartoitus". Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 2006.
- [8] Kuosa, D. Asiantuntijakeskusteluita. Fingrid Oyj.
- [9] IEC 60270. "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements". 3. painos. 2000. 99 s.
- [10] Klüss, J. S-18.4149 Condition Monitoring of Electrical Equipment -kurssin luentomateriaali. Aalto-yliopisto. Espoo. 2012. [Viitattu 4.2.2013]  
Saatavilla: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-18.4149/etusivu>
- [11] Klüss, J. S-18.3150 High Voltage Engineering -kurssin luentomateriaali. Aalto-yliopisto. Espoo. 2012. [Viitattu 4.2.2013]  
Saatavilla: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-18.3150/etusivu>
- [12] Hashmi, G. M., "Partial Discharge Detection for Condition Monitoring of Covered-Conductor Overhead Distribution Networks using Rogowski Coil". Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 2008.

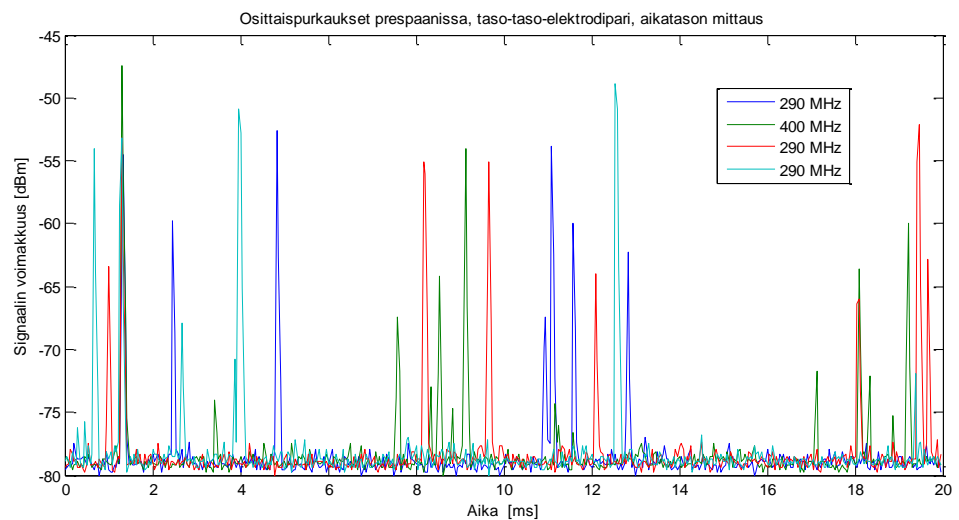
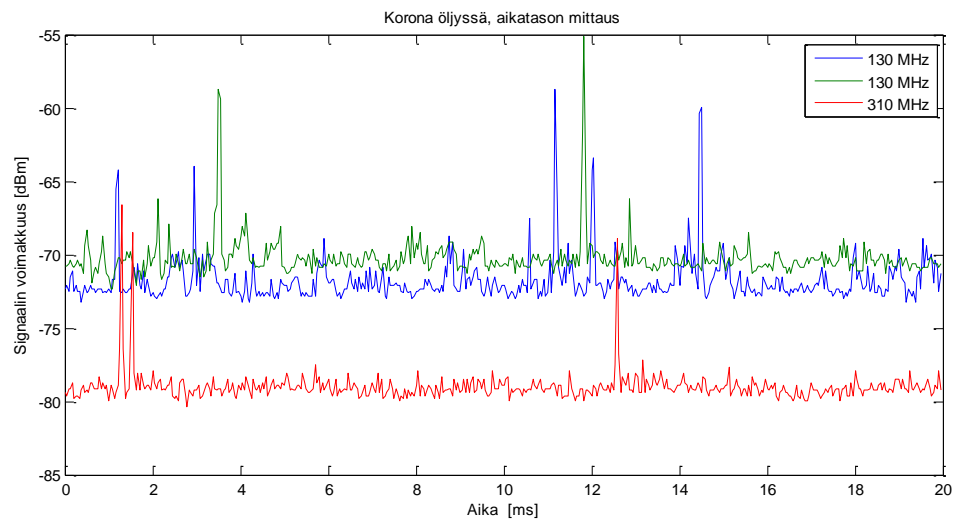
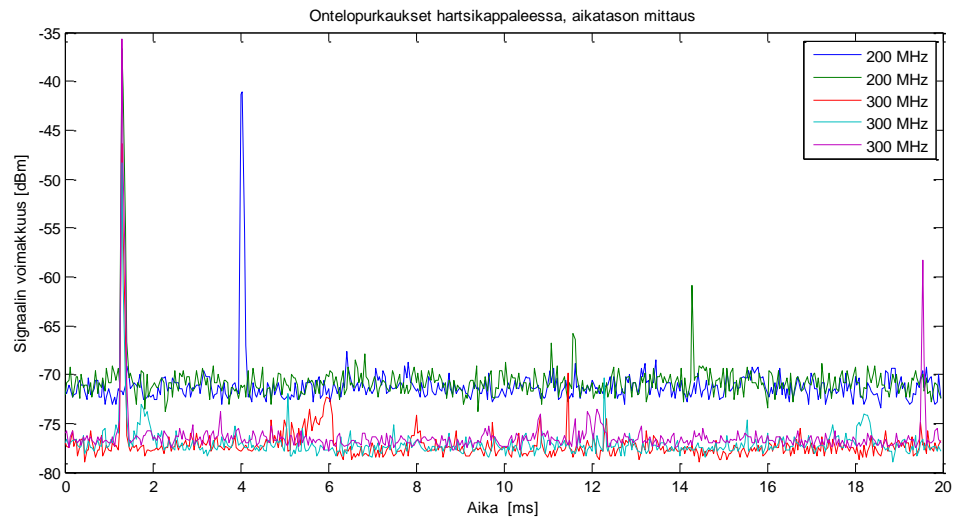
- [13] Paoletti, G. & Golubev, A. "Partial discharge theory and applications to electrical systems". Teoksessa: IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1999. S. 124–138.
- [14] Boggs, S. & Densley, J. "Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing". IEEE Electrical Insulation Magazine. 2000. Vol. 16:5. S. 13–18. ISSN: 0883-7554
- [15] Okabe S., Ueta, G., Wada H. & Okubo H. "Partial discharge-induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17:5. S. 1649–1656. ISSN: 1070-9878
- [16] Edin, H. "Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage". Väitöskirja. Kungliga Tekniska högskolan. Tukholma. 2001.
- [17] Boggs, S. A. "Partial discharge: Overview and signal generation". IEEE Electrical Insulation Magazine. 1990. Vol. 6:4. S. 33–39. ISSN: 0883-7554
- [18] Nousiainen, K. "Käyttöolosuhteiden vaikutus keskijännitelaitteiden osittaispurkausilmiöihin". Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere. 1982.
- [19] Khawaja, R. H., Ariastina, W. G. & Blackburn, T. R. "Partial Discharge Behaviour in Oil-impregnated Insulation." Teoksessa: Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Vol. 3. S. 1166–1169.
- [20] Cigre Working Group D1.33, Task Force 05. "High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement." CIGRE. 2012. ISBN: 978-2-85873-194-7
- [21] Krivda, A. "Automated recognition of partial discharges." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2:5. S. 796–821. ISSN: 1070-9878
- [22] Sihvola, A. & Lindell, I. "Sähkömagneettinen Kenttäteoria 2. Dynaamiset Kentät". 5. painos. Helsinki. 2003. ISBN: 951-672-340-3
- [23] Räisänen A. & Lehto, A. "Radiotekniikan Perusteet". 13. painos. Helsinki. 2011. ISBN: 978-951-672-367-2
- [24] Portugues, I. E., Moore, P. J., Glover, I. A., Johnstone, C., McKosky, R. H., Goff, M. B. & Van der Zel, L. "RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations". IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. Vol. 24:1. S. 20–29. ISSN: 0885-8977

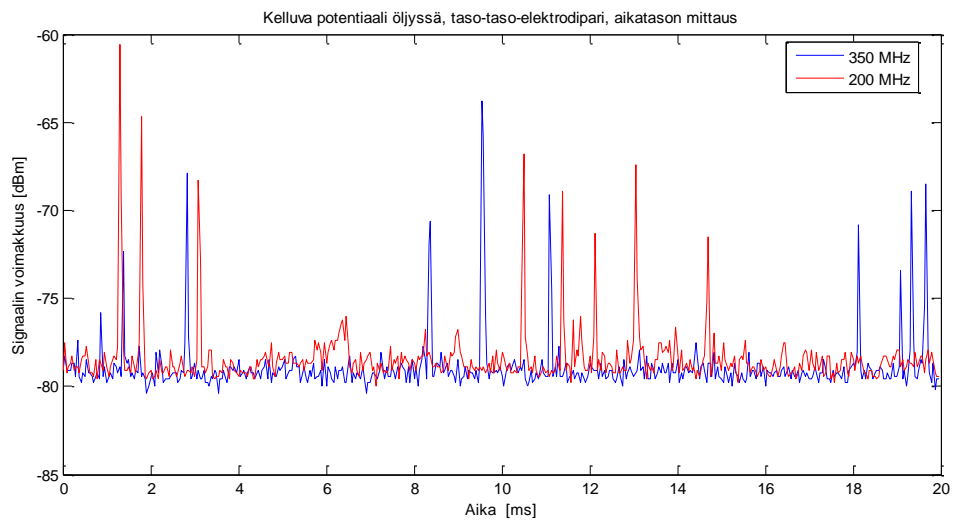
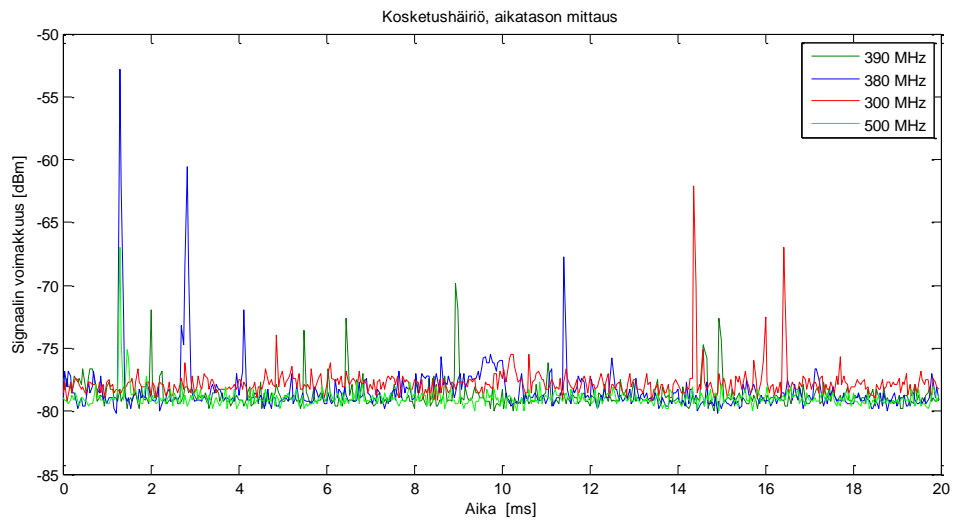
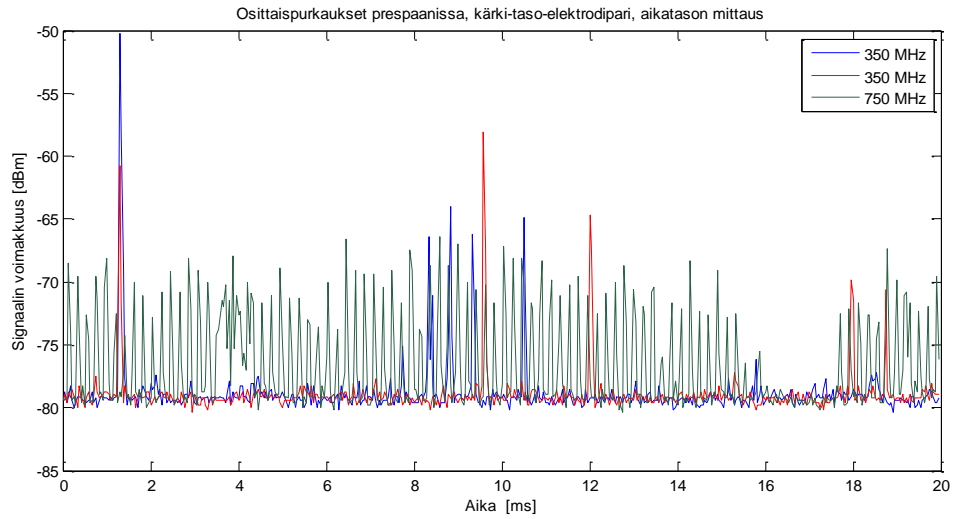
- [25] Reid, A. J. , Judd, M. D. , Fouracre, R. A., Stewart, B. G. and Hepburn, D. M. "Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Vol. 18:2. S. 444–455. ISSN: 1070-9878
- [26] Nesbitt, A., Stewart, B. G., McMeekin, S. G., Conner, S., Gamio, J. C., Hall, L., Capel, C., Lieblich-Lien, K., Kristiansen H. O. & Kråkenes, S. "High voltage substation surveillance using radio frequency interference measurement." 76 Th. Annual International Doble Client Conference. 2009.
- [27] Babnik, T. , Aggarwal, R. K., Moore, P. J. & Wang, Z. D. "Radio frequency measurement of different discharges." Teoksessa: Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna, 2003. Vol.3.
- [28] Raja K. & Floribert T. "Source characterization of discharges in transformers using UHF PD signatures". Teoksessa: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. Vol.2. S. 1383–1388.
- [29] IEC/TS 62478 Ed. 1.0 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Proposed Horizontal Standard.
- [30] Doble TransiNor AS. "PDS100 Partial Discharge Surveyor User Guide". 2009.
- [31] SLO. "Lausunto ulkopäätte XVKUP 49800 20 kV viasta". 2012.

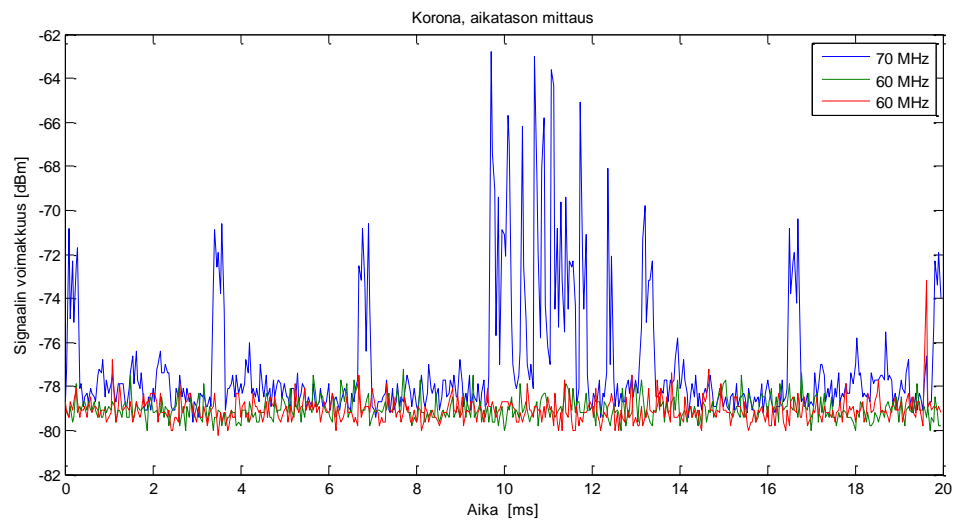
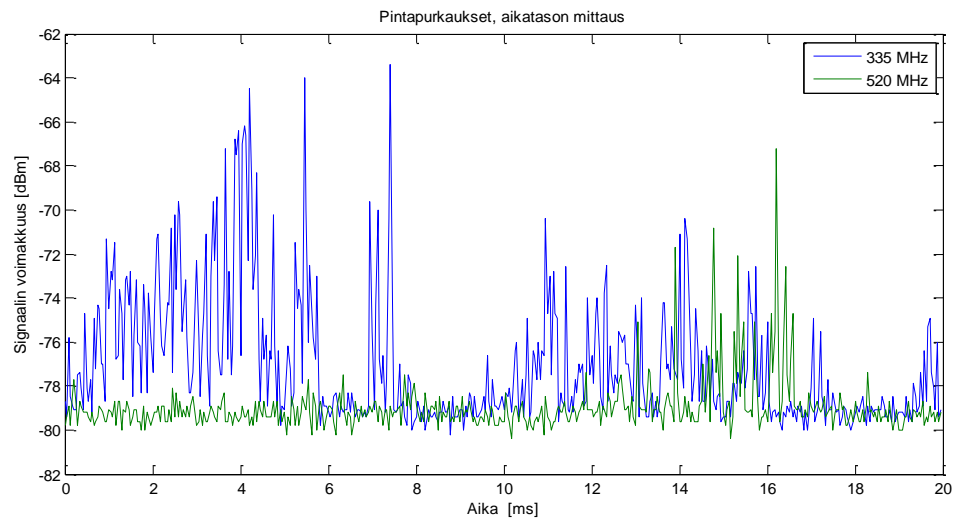
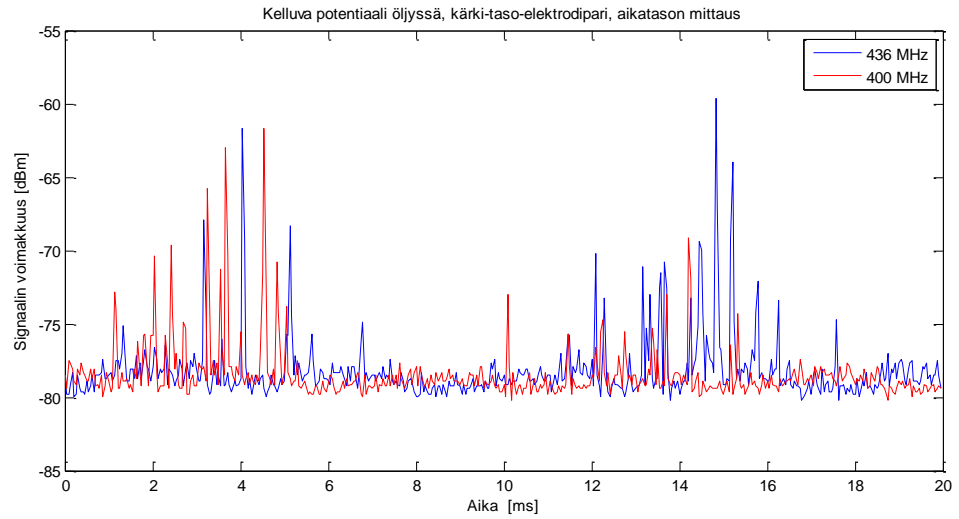


## Liitteet

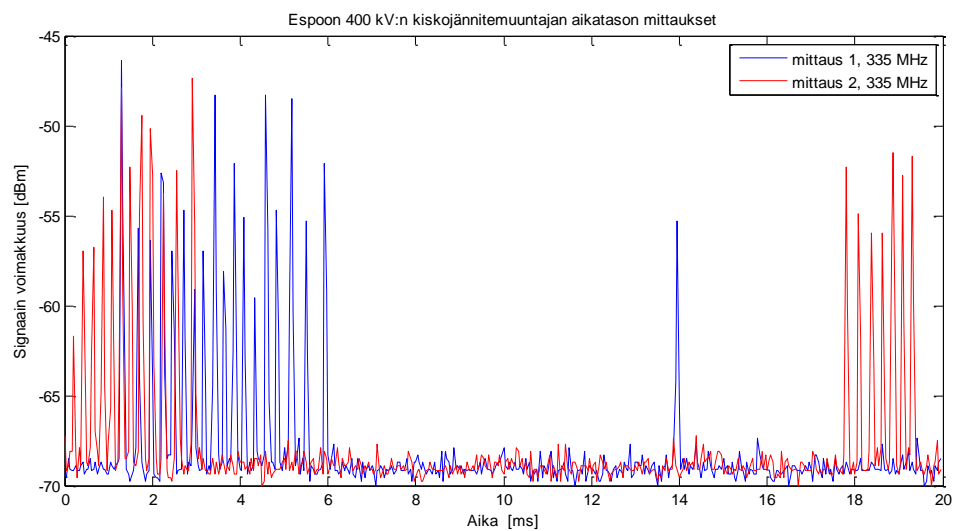
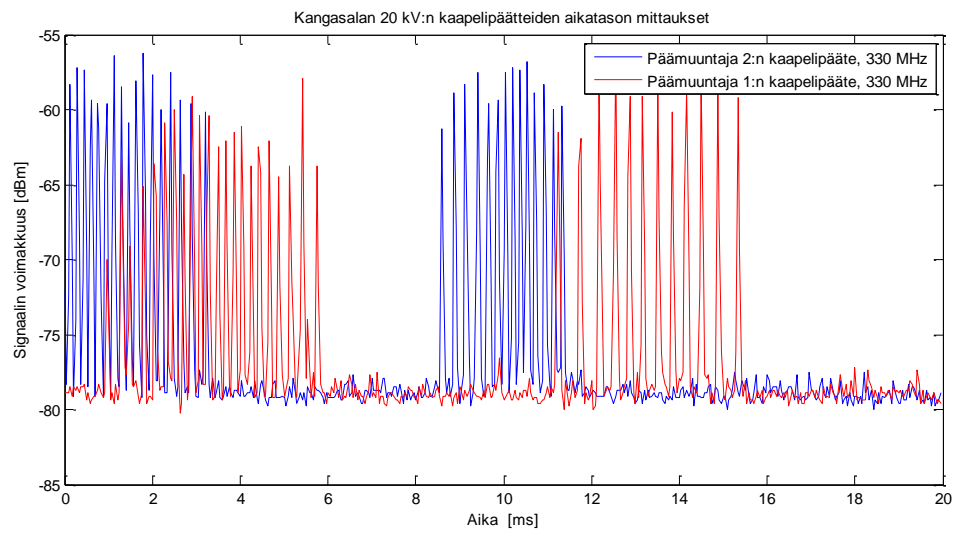
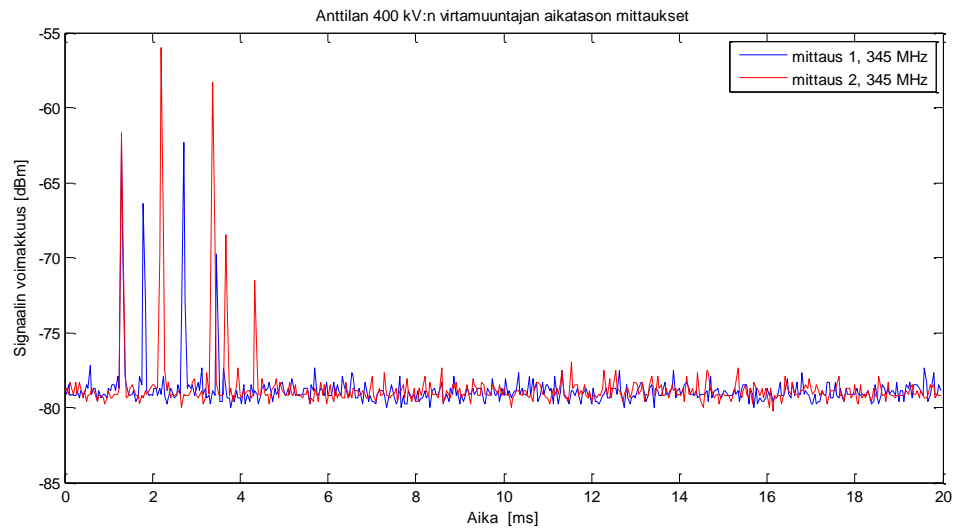
### LIITE A - Laboratoriomittausten aikatason tulokset

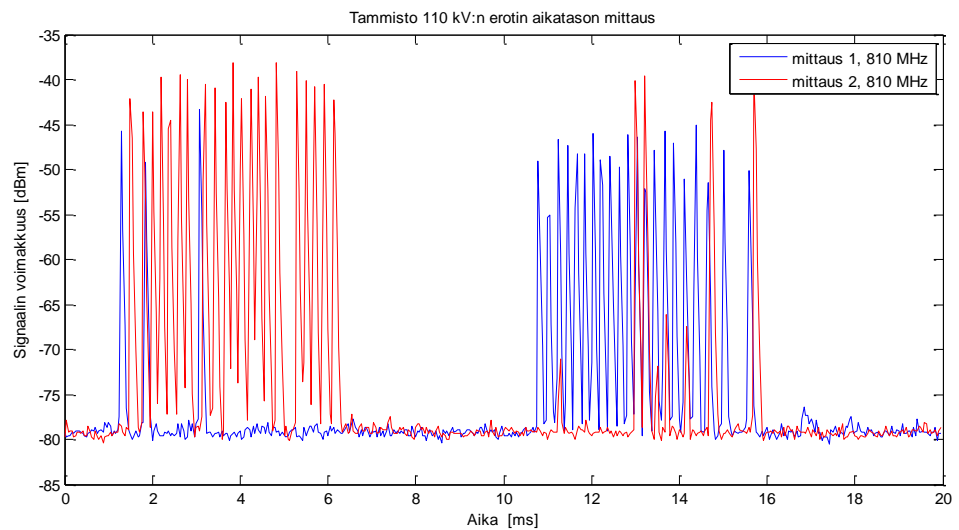
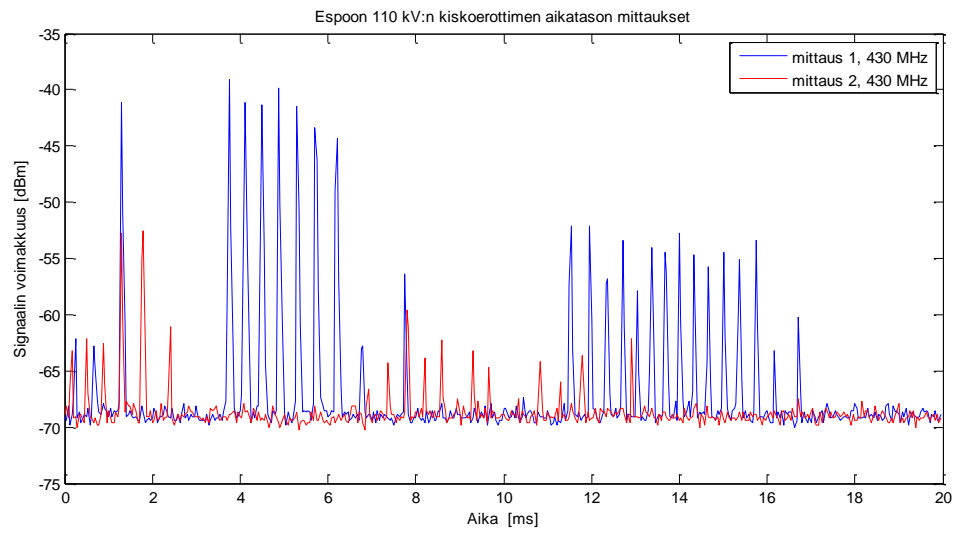
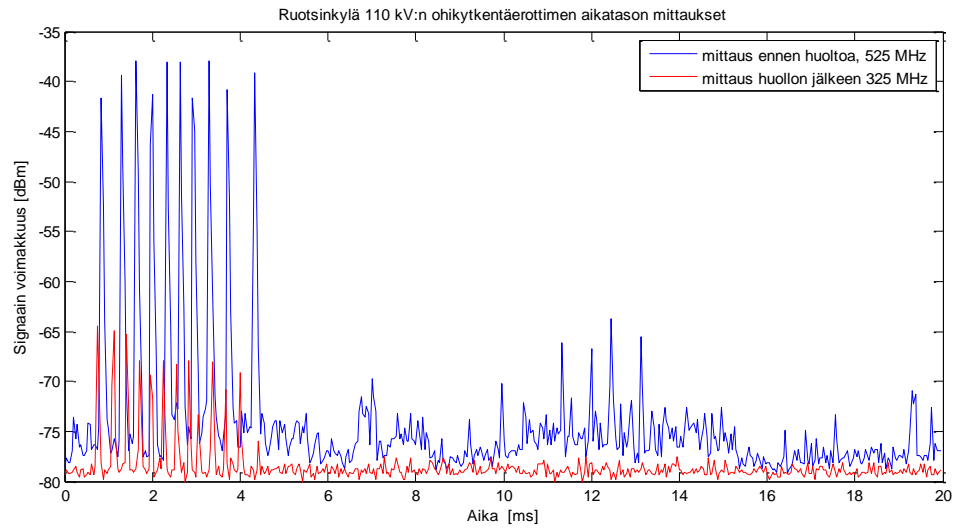






## LIITE B - Sähköasemamittausten aikatason tulokset





**LIITE C - Anttilan 400 kV:n virtamuuntajien öljyanalyysin tulokset**

| Vaihe    | H <sub>2</sub><br>vety | CO <sub>2</sub><br>hiilidioksidi | CO<br>hiilimonoksidi | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub><br>etyyleeni | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub><br>etaani | CH <sub>4</sub><br>metaani | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub><br>asetyleeni | TDCG<br>palavat<br>vikakaasut |
|----------|------------------------|----------------------------------|----------------------|--|---|----------------------------|---|-------------------------------|
| L1       | 8 ppm                  | 36 ppm                           | 32 ppm               | 1 ppm                                      | 1 ppm                                   | < 1 ppm                    | 0 ppm                                       | 44 ppm                        |
| L2       | < 5 ppm                | 336 ppm                          | 14 ppm               | 1 ppm                                      | 2 ppm                                   | 2 ppm                      | < 0,5 ppm                                   | 21 ppm                        |
| L3       | < 5 ppm                | 252 ppm                          | 19 ppm               | 2 ppm                                      | 3 ppm                                   | 3 ppm                      | 0 ppm                                       | 31 ppm                        |
| Suositus | < 150 ppm              | < 14000 ppm                      | < 600 ppm            | < 280 ppm                                  | < 90 ppm                                | < 130 ppm                  | < 20 ppm                                    | < 700 ppm                     |

Kaasuanalyysissä käytettiin Kelman Ltd Transport X -analysaattoria.